



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program: M 2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika se zaměřením na mechaniku tekutin a
termodynamiku

Měření tlakově citlivými nátěry

Measurement with pressure sensitive paints

Diplomová práce

Autor: **Veronika Schmidtová**

Vedoucí práce: doc. ing. Václav Dvořák, PhD.

Konzultant: ing. Tomáš Jelínek

V Liberci 4.6.2011



Prohlášení

Byla jsem se seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jeho skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

4. 6. 2011

Veronika Schmidtová



Poděkování

Na tomto místě diplomové práce bych ráda poděkovala všem, díky jejichž podpoře a radám mohla tato diplomová práce vzniknout: vedoucímu diplomové práce doc. ing. Václavu Dvořákovi, PhD., konzultantovi ing. Tomáši Jelínkovi, kolektivu divize Aerodynamika Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu, a.s., zejména pak ing. Martinu Němcovi, ing. Jiřímu Benetkovi, CSc. a ing. Jiřímu Ulrychovi, PhD. (in memoriam), ing. Petru Pickovi, panu Petru Kozákovi, ing. Marku Lojínovi, ing. Petru Strakovi, PhD., mgr. Davidovi Zachovi, ing. Jiřímu Fialovi, dále děkuji paní Daniele Stejskalové a studijnímu oddělení fakulty strojní Technické univerzity. Zvláštní poděkování patří mým rodičům Heleně a Janovi, sestře Ditě, panu Danu Střihavkovi, ing. Vítovi Lédlovi, PhD.

Tuto práci věnuji dceři Heleně.



Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o rozvoji metody zvané PSP (z anglického názvu „pressure sensitive paint“, tedy nátěr citlivý na tlak) v aerodynamickém experimentu. Zahrnuje popis rozvoje systému přivezeného na pracoviště Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu, a.s. z nizozemské divize DNW a několik etap aplikace PSP v praxi. Zejména potom experiment v aerodynamickém tunelu pro transsonické rychlosti, kde se měřilo na vrtulovém profilu F8 (v konfiguraci „práh“). V práci je porovnán výsledek aerodynamického experimentu s numerickým výpočtem a zhodnocena nejistota měření stávajícím PSP systémem.

This thesis deals with development of PSP method („pressure sensitive paint) in an aerodynamical experiment. It covers description of development of the system brought from DNW (Amsterdam) to Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. (Aerodynamical Research and Test Institute) and few measurement campaigns. Especially it's about an experiment in a transonic wind-tunnel, where the tests were held on a propeller profile F8. The experimental results are compared to a numerical counting in this thesis and also the uncertainty is evaluated.



Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	10
Seznam symbolů, zkratk a termínů	11
1 Úvod	12
2 PSP v aerodynamických laboratořích	14
2.1 Vývoj ve světě	14
2.2 PSP ve VZLÚ	14
3 Teoretický základ tlakově citlivých nátěrů	18
3.1 Základní fyzikální model	18
3.1.1 Luminiscence	18
3.1.2 Kyslíkové zhášení	19
3.1.3 Základní vztahy	20
3.2 PSP: tlakově citlivý nátěr	24
3.3 Detekce	25
3.4 Náklady na pořízení jednoduchého PSP do laboratoře	26
4 Měřicí kampaň	28
4.1 Plán měření	28
4.2 Rozpis testů	28
5 Měřicí řetězce, vybavení, software	30
5.1 Měřicí řetězec pro kalibraci „a priori“	30
5.2 Měřicí řetězec pro měření v aerodynamickém tunelu	31
5.2.1 Model, teplotní měření na modelu	32
5.2.2 Tlaky	35
5.2.3 Optika	36
5.2.4 Software	38



6 Zpracování dat	40
7 Matematické modelování – Fluent	43
7.1 Fyzikální a matematický model	43
8 Výsledky	46
8.1 Kalibrace „a priori“ a „in situ“	46
8.1.1 Kalibrace a priori	46
8.1.2 Testování PSP – metoda in situ	48
8.1.3 Výsledky měření	48
8.2 PSP měření v místech bez odběrů	51
8.3 Měření na profilu – tlaky <i>s</i> a <i>bez</i> PSP	55
8.4 Měření s nátěrem novým a nátěrem degradovaným	59
8.5 Porovnání experimentu a numerického výpočtu problému	61
9 Závěr	68
Použitá literatura	71



Seznam obrázků

Obr. 2.1: Výsledek práce s PSP: tlakové rozložení na modelu stíhačky Dassault/Dornier Sloha.....	15
Obr. 2.2: Historická fotografie původního systému z DNW (2007).....	17
Obr. 3.1: Jablonského energetický diagram absorpce a emise fotonu luminoforem.....	20
Obr. 3.2: Křivka zhasínání luminiscence pořízená při měření v aerodynamickém tunelu.....	23
Obr. 3.3: Excitační a emisní spektrum pro nátěr s platinovým porphyrinem.....	26
Obr. 5.1: Schéma optické cesty.....	30
Obr. 5.2: Měřicí prostor aerodynamického tunelu se systémem pro PSP měření.....	32
Obr. 5.3: Nátěrem nastříkaný profil upevněný na průhledu a průhled	34
Obr. 5.4: Model s konfigurací odběrů a teplotním snímačem Pt100 u druhého odběru.....	35
Obr. 5.5: Schéma zapojení tlaků v tunelu a na modelu.....	36
Obr. 5.6: Schéma zobrazující průběh napájecího napětí LED diody.....	37
Obr. 5.7: Ukázka blokového schématu měřicího programu v LabView.....	38
Obr. 6.1: Vykrešené decay křivky.....	41
Obr. 6.2: Ukázka z uživatelského prostředí ze softwaru na zpracování decay křivek.....	42
Obr. 7.1: Detail výpočtové sítě v softwaru Fluent.....	44
Obr. 7.2: Výpočtová síť.....	45
Graf 1: Kalibrační křivky tlakově citlivého nátěru pro různé teploty.....	47
Graf 2: Porovnání vyhodnocení PSP metodou „in situ“ a „a priori“ pro režim $M_\infty = 0,524$	49
Graf 3: Porovnání vyhodnocení PSP metodou „in situ“ a „a priori“ pro režim $M_\infty = 0,672$	49
Graf 4: Porovnání vyhodnocení PSP metodou „in situ“ a „a priori“ pro režim $M_\infty = 0,878$	50
Graf 5: Porovnání vyhodnocení PSP metodou „in situ“ a „a priori“ pro režim $M_\infty = 0,948$	50
Grafy 6, 7: Metoda in situ, skenování mezi pneumatickými odběry pro režimy $M_\infty = 0,519 ; 0,750$	51
Grafy 8, 9: Metoda in situ, skenování mezi pneumatickými odběry pro režimy $M_\infty = 0,826 ; 0,924$	51
Obr. 8.1: Vrtulový profil.....	52



Graf 10: Měření pneumatickými odběry a metodou in situ na modelu prahu; režimy $M_{\infty} = 0,274$ a $M_{\infty} = 0,396$	53
Graf 11: Měření pneumatickými odběry a metodou in situ na modelu prahu; režimy $M_{\infty} = 0,460$ a $M_{\infty} = 0,520$	53
Graf 12: Měření pneumatickými odběry a metodou in situ na modelu; režimy $M_{\infty} = 0,593$ a $M_{\infty} = 0,671$	54
Graf 13: Měření pneumatickými odběry a metodou in situ na modelu prahu; režimy $M_{\infty} = 0,774$ a $M_{\infty} = 0,819$	54
Graf 14: Měření pneumatickými odběry a metodou in situ na modelu prahu; režimy $M_{\infty} = 0,866$ a $M_{\infty} = 0,915$	55
Graf 15: Procentuální porovnání rozdílů c_p v jednotlivých odběrech.....	58
Grafy 16, 17: Měření vlivu vrstvy nátěru na proudové pole kolem modelu, režimy $M_{\infty} = 0,396$ a $M_{\infty} = 0,459$ (resp. $M_{\infty} = 0,464$).....	58
Grafy 18, 19: Měření vlivu vrstvy nátěru na proudové pole kolem modelu, režimy $M_{\infty} = 0,519$ a $M_{\infty} = 0,592$	58
Grafy 20, 21: Měření vlivu vrstvy nátěru na proudové pole kolem modelu, režimy $M_{\infty} = 0,777$ a $M_{\infty} = 0,814$	58
Grafy 22, 23: Různé křivky pro různé „staré“ nátěry.....	59
Grafy 24, 25: Měření na starém nátěru pro režimy $M_{\infty} = 0,308$ a $M_{\infty} = 0,519$	60
Grafy 26, 27: Měření na starém nátěru pro režimy $M_{\infty} = 0,685$ a $M_{\infty} = 0,812$	60
Graf 28: Kontury Machova čísla okolo modelu prahu, $M_{\infty} = 0,52$	62
Graf 29: Kontury statického tlaku okolo modelu prahu, $M_{\infty} = 0,52$	62
Graf 30: Kontury Machova čísla okolo modelu prahu, $M_{\infty} = 0,671$	63
Graf 31: Kontury statického tlaku okolo modelu prahu, $M_{\infty} = 0,671$	63
Graf 32: Kontury Machova čísla okolo modelu prahu, $M_{\infty} = 0,866$	64
Graf 33: Kontury statického tlaku okolo modelu prahu, $M_{\infty} = 0,866$	64



Graf 34: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,520$	65
Graf 35: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,593$	65
Graf 36: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,671$	66
Graf 37: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,721$	66
Graf 38: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,777$	67
Graf 39: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,866$	67

Seznam tabulek

Tabulka č. 1	27
Tabulka č. 2	29
Tabulka č. 3	29
Tabulka č. 4	56



Seznam symbolů, zkratek a termínů

$A_{ref} (-)$	teplotně závislá materiálová konstanta
$B_{ref} (-)$	teplotně závislá materiálová konstanta
$c_1 (m \cdot s^{-1})$	rychlost (světla)
$c_p (-)$	tlakový koeficient
c (counts, -)	počty napěťových pulsů \approx počtu fotonů
$h (J \cdot s)$	Planckova konstanta
$I_{ref} (W)$	referenční intenzita při atmosférickém tlaku
$I (W)$	intenzita
$I_{p=0} (W)$	intenzita při nulovém tlaku
$knr (\mu s^{-1})$	konstanta energetického procesu deaktivace molekuly
$kr (\mu s^{-1})$	konstanta energetického procesu luminiscence
$kq (\mu s^{-1})$	konstanta energetického procesu při kyslíkovém zhášení
$L (J)$	energie spojená s luminiscencí
$M (-)$	Machovo číslo
$M_\infty, M^\infty (-)$	Machovo číslo nabíhajícího proudu
$p (Pa)$	tlak
$p_{atm} (kPa)$	atmosférický tlak
p_{ref}	statický tlak
p_{stat}	referenční tlak
S	označení pro energetické hladiny v Jablonského diagramu
$T (^\circ C)$	teplota
$x/t (-)$	vzdálenost od počátku/ délka těživy
$\Delta (J)$	energie vyzářená při procesu deaktivace
$\lambda (nm)$	vlnová délka
$\lambda' (nm)$	vln. délka fotonu vyzářeného excitovanou molekulou
τ (tau, μs)	čas zhasínání křivky
τ_{ref} (tau_ref, μs)	referenční čas zhasínání křivky při atmosférickém tlaku
$\tau_0 (\mu s)$	čas zhasínání křivky při nulovém tlaku



1 Úvod

Diplomová práce „Měření tlakově citlivými nátěry“ vznikla v průběhu rozvoje měřicího zařízení pro měření tlaků v aerodynamickém experimentu na pracovišti aerodynamiky vysokých rychlostí Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu, a.s.

Při vývoji moderních strojů se dnes běžně využívají nástroje numerické matematiky, nicméně v oblasti aerodynamiky – a to jak vnitřní, tak vnější – je obvyklé, že pro komplexnost výsledků se teoretické poznatky ověřují experimentálně. Výsledky experimentu jsou potom běžně konfrontovány s numerickými výpočty a rovněž slouží k jejich dalšímu rozvoji.

V aerodynamickém experimentu existuje celá řada veličin, které se měří. Jednou ze základních stále zůstává měření tlaků pomocí odběrů: model budoucího stroje nebo některé jeho části (například křídlo letadla či lopatková mříž turbíny) je umístěn v aerodynamickém tunelu s proudícím médiem, nejčastěji vzduchem. Tlak, který působí na měřená místa, je odveden úzkým potrubím mimo prostor tunelu ke snímačům. Tato metoda vyžaduje náročné konstrukční úpravy modelu, navíc počet takových odběrů zůstává omezený. Proto se hledají způsoby, jak tlakové rozložení na povrchu modelu zjistit jinak; z tohoto důvodu se hojně rozvíjejí optické metody měření tlaků.

Pro měřicí metodu, jejíž rozvoj bude popsán v této práci, se vžila zkratka PSP (název vychází z anglického názvu Pressure sensitive paint, čili „tlakově citlivý nátěr“) a jedná se o metodu chemicko – optickou.

Metoda je relativně mladá, ve velkých výzkumných pracovištích v Evropě a po celém světě ale rozvinutá do podoby, kdy často nahrazuje měření klasickými tlakovými odběry. V České republice se jí v aerodynamickém experimentu – a jejímu uvedení do praxe – nikdo systematicky nevěnuje. Je pravda, že pořízení zařízení na světové úrovni je milionová investice a je otázka, zda je potom taková případná investice v našich podmínkách návratná. Obrovskou výhodou na druhé straně je fakt, že použití PSP je poměrně jednoduché, časově



nenáročné a výsledkem je tlakové rozložení po celé měřené ploše, přičemž model je po skončení měření jednoduše a rychle možné nátěru zbavit.

V práci byla dodržena konvence zmíněná na začátku a ve výsledcích vedle sebe stojí experimentálně naměřená data (PSP a klasické tlakové odběry) a numerický model. Numerický výpočet byl proveden za pomoci softwaru Fluent.

Vývoj metody podporoval Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., kde hlavní motivací byla možnost snímání podrobného tlakového rozložení právě na lopatkách turbínových strojů. Detailně zaznamenávané tlakové rozložení na lopatkách podpoří významným způsobem vývoj numerických metod a tím i postupy při návrhu strojů.



2 PSP v aerodynamických laboratořích

2.1 Vývoj PSP ve světě

Historickým základem metody je objev závislosti intenzity luminiscence na okolním tlaku publikovaný v roce 1919 německým fyzikem Otto Sternem a německým chemikem Maxem Volmerem [1]. Nicméně, první výsledky v aerodynamickém experimentu byly představeny o 70 let později. Pionýry v této oblasti byly týmy na University of Washington (1990), CAGI (Centralnyj Aerogydrodynamičeskij Institut) ve spolupráci s italskou společností INTECO (1991), dále se přidali velcí letečtí producenti (McDonnell Douglas, 1993; Boeing) a NASA.

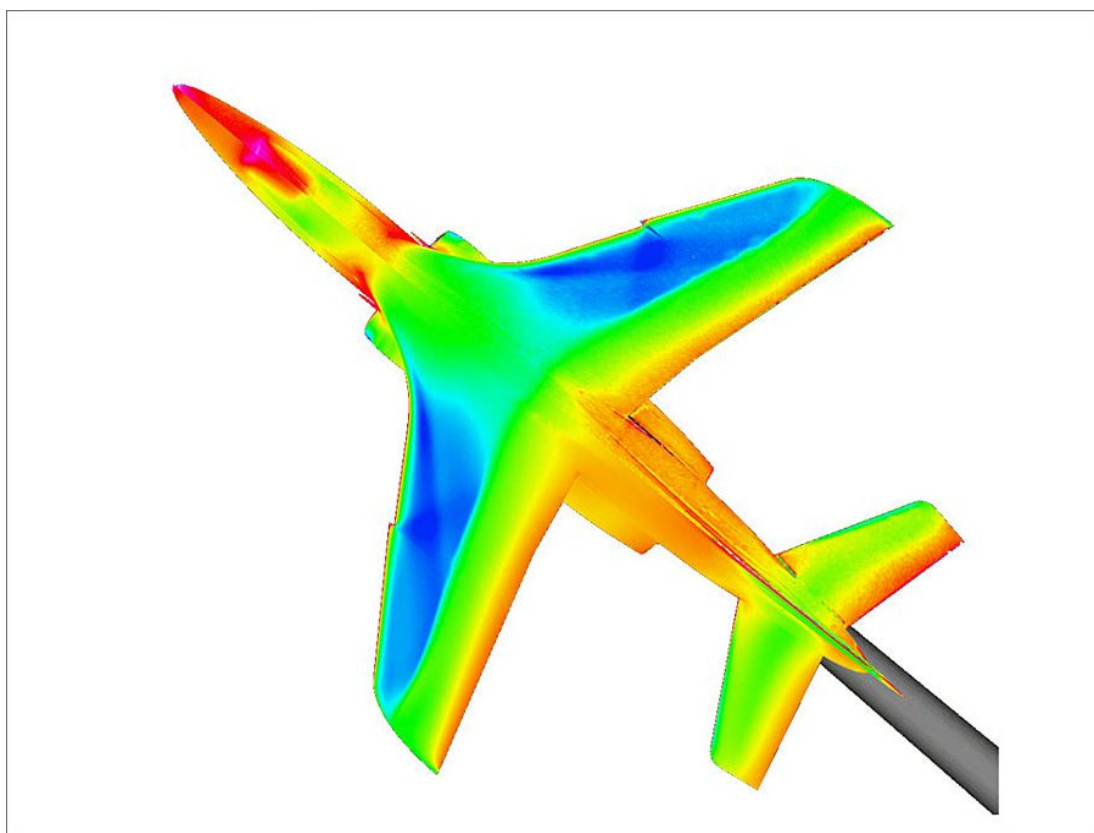
Metoda měření pomocí PSP ve vnitřní i vnější aerodynamice zažila velký rozmach v průběhu posledních deseti let. Přestože v této oblasti nadále pokračuje výzkum, je možné konstatovat, že velké aerodynamické laboratoře již PSP měření zvládly pro vysoké rychlosti (supersonické, transsonické, subsonické) i nízké rychlosti, kde dochází jen k malým změnám tlaku a nátěr musí být velmi citlivý. Nové výzkumy se soustředí na oblast nestacionárního proudění. Zajímavé práce byly publikovány z měření mikrozařízení, kupříkladu mikroturbín či mikrotrysek o rozměrech v řádech jednotek až desítek milimetrů (viz například [2]).

Vývoj neposouvá dále jen metodu, ale i jednotlivé součásti, například tlakově citlivý nátěr se dnes již běžně používá v kombinaci s teplotně citlivým nátěrem (TSP; „temperature sensitive paint“, teplotně citlivý nátěr).

Pokročilé výzkumy na téma PSP provádějí v Evropě například: francouzský výzkumný ústav letectví ONERA (Marie-Claire Mérienne se se svým týmem věnuje této problematice poměrně dlouho, pravidelně publikuje výsledky svých výzkumů, viz např. [3], [4]); německo-nizozemský DNW disponující velkým výzkumným týmem a pokročilou technologií (viz 3D měření na modelu popsané – zejména s ohledem na unikátní software, který zde byl vyvinut - v článku [5]; dále například pro rok 2009 měl tým DNW v úmyslu realizovat PSP měření na křídle kmitajícím s frekvencí 90Hz); Airbus v Německu; italská CIRA; DLR; BAE Systems ve Velké Británii. Ve světě se PSP věnují vědecké týmy

v NASA; v japonské JAXA; tým leteckých inženýrů z Tohoku University v Japonsku řešil nestacionární měření na experimentech v hypersonickém tunelu ($M=10$, $T=900-1200K$, délka chodu tunelu 30-50ms), dále na rázových trubicích a nestacionárním poli na křídle.

Další zajímavé články kromě výše zmíněných o pokročilých aplikacích PSP jsou například [6] (transonický stupeň osového kompresoru) a [7] (podrobný článek o pokročilé technologii měření pomocí PSP v oblasti nestacionárního měření).



Obr. 2.1: Výsledek práce s PSP: tlakové rozložení na modelu stíhačky Dassault/Dornier Alpha (www.scientificamerican.com, 26.2.2009 [8]). Původní černobílá škála (výstup z měření) byla pro výsledný obrázek převedena na barevnou. (Ve zdroji nebyla uvedena stupnice.)



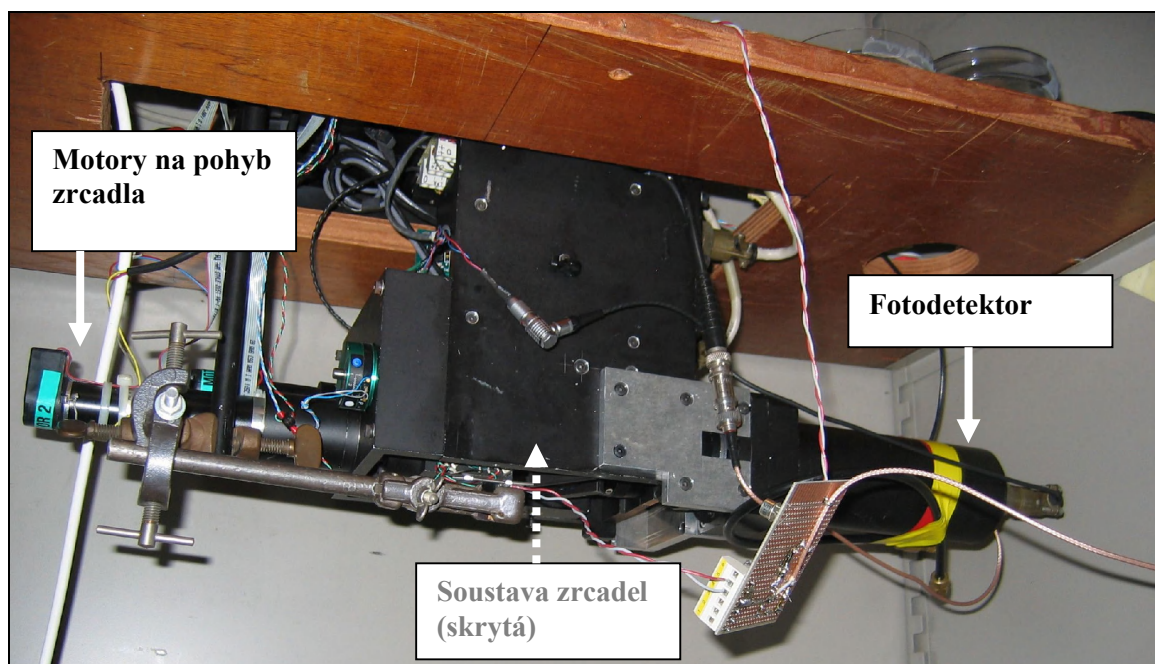
2.2 PSP ve VZLÚ

Rozvoj PSP se uskutečňuje ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu, a.s. (dále VZLÚ) na pracovišti aerodynamiky vysokých rychlostí. Původně byl na toto pracoviště v roce 2008 dovezen systém z DNW v rámci výměny znalostí v evropském projektu Excellence sdružující evropská pracoviště s aerodynamickými tunely EWA (European Windtunnel Assosiation). Pracoviště VZLÚ mělo za úkol tento PSP systém otestovat, upravit pro své aplikace a případně dále rozšiřovat.

Pro zařízení byl stanoven dlouhodobější cíl: využít PSP k tlakovému měření na přímých lopatkových mřížích. Tím se doplní klasické měření pomocí pneu odběrů a naplno se využije možnost stávajícího PSP systému. Výsledkem bude podrobné měření na odtokové hraně s vysokým rozlišením nejdříve v jedné ose, později i plošně.

Pomocí sestavy z DNW se podařilo získat základní představu o tom, jak systém funguje. Některé původní součásti (například software psaný v programovém prostředí Labview) byly na vysoké úrovni, jiné vyžadovaly menší zásahy (zejména celková konstrukce), některé bylo potřeba vyměnit či nahradit.

Rok 2010 byl pro rozvoj PSP ve VZLÚ klíčový. Na začátku roku se dokončilo ladění teplotní kalibrace v tlakové kalibrační komoře, poté se ve spolupráci s externí firmou specializovanou na optiku řešila optická cesta. Rozsáhlejší měřicí kampaň, jež se spustila na podzim a jejíž průběh a výsledky jsou obsaženy v této práci, završila celou etapu měřením v aerodynamickém tunelu.



Obr. 2.2: Historická fotografie původního systému z DNW (2007), zařízení v tomto vývojovém stádiu bylo dovezeno do VZLÚ. Dá se dobře využít pro kalibraci nátěru v kalibrační komoře, ale obtížněji se montuje na aerodynamický tunel. V pokročilém stádiu vývoje se nacházela optická cesta (fotonásobič, soustava zrcadel, motory na pohyb jednoho ze zrcadel ve dvou osách), ale pro praktičtější využití nemohl systém zůstat takto robustní.

3 Teoretický základ tlakově citlivých nátěrů

V principu se jedná o metodu, která spojuje chemické a optické vlastnosti jistých organických molekul. Měřený model se pokryje nátěrem obsahujícím luminiscenční molekuly, ozáří se a následně se zjišťuje intenzita emitovaného záření, případně délka trvání luminiscence. Z těchto hodnot podle vztahů, jež budou uvedeny dále, lze dospět k údajům o tlaku ve vyšetřovaném místě. Čím větší tlak na model působí, tím slabší či kratší luminiscence je. Existují dva přístupy k PSP: metoda *intensity* (zjišťuje se intenzita záření) a metoda *lifetime* (zjišťuje se délka zhasínání luminiscence).

3.1 Základní fyzikální model

PSP je postaveno na schopnosti *photoluminiscence* prvků či sloučenin. Tedy na schopnosti molekul absorbovat záření určité vlnové délky, dostat se tím ze stavu základního do excitovaného a po disipaci určitého množství energie vyžářit foton jiné vlnové délky zpět při návratu do stavu základního.

3.1.1 Luminiscence

Princip absorpce a emise světla znázorňuje Jablonského energetický diagram (viz obr. 3.1). Ten zobrazuje procesy spojené s vyzařením fotonu excitovanou molekulou senzoru. Jedná se o (zleva) *fluorescenci*: elektron inzultovaného prvku je ze základní hladiny 'vybuzen' absorbovaným fotonem odpovídající vlnové délky. V excitovaném pásmu (tzv. singletovém pásmu, na obrázku označeném S1) disipuje do okolí část kmitavé energie elektronu (během tzv. relaxačního času), který se potom vrací do základní hladiny. Energetický schodek mezi maximy spekter absorbovaných fotonů (o vyšší energii) a emitovaných fotonů (o nižší energii) luminoforu se nazývá Stokesův posuv (viz obr. 3.3). Nižší energie vyzařovaného fotonu znamená nižší frekvenci a tedy větší vlnovou délku vyzařovaného světla oproti světlu absorbovanému. Fluorescence trvá pouhé desítky nanosekund, její zachycení je



instrumentálně náročné, ale krátká doba záření se dá s úspěchem využít při nestacionárních měřeních.

Fosforescence se principiálně blíží fluorescenci, ale elektron se při relaxační ztrátě energie ocitne v „zakázaném“, energeticky nevyhovujícím tzv. tripletovém pásmu. Zde setrvá řádově nejméně milisekundy. Odtud se vrací do neexcitovaného stavu za současného vyzáření fotonu. Fosforescence může trvat i dny.

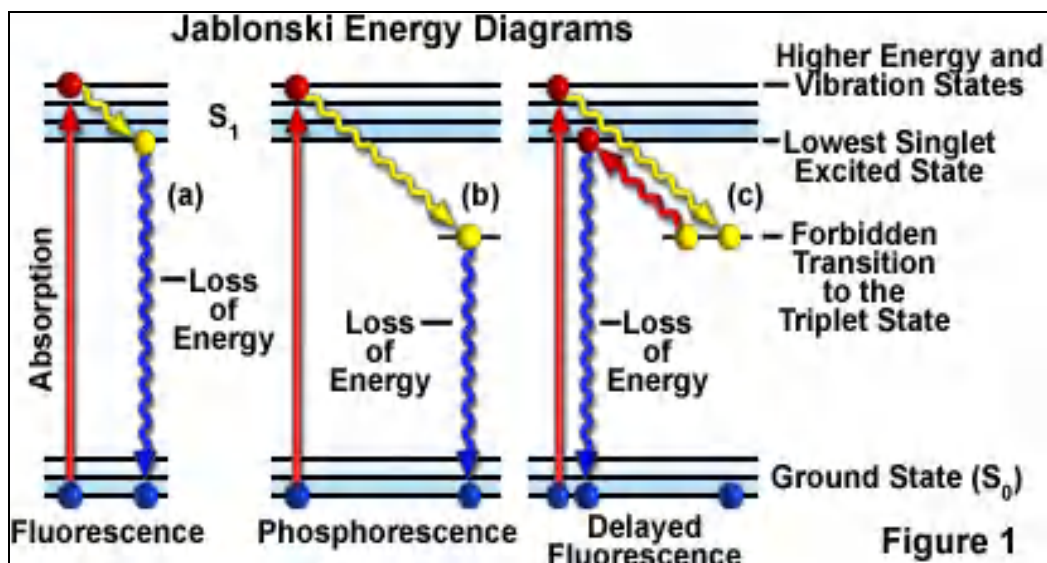
Nebo se excitovaný elektron při výdeji „relaxační“ energie „propadne“ do zakázaného tripletového stavu, odtud se vrátí do povoleného singletového pásma a deaktivuje se za doprovodu fluorescence. Tento průběh absorpce a emise světla byl pojmenován *opožděná fluorescence*. Všechny tři možnosti jsou využity při technice PSP.

3.1.2 Kyslíkové zhášení

Kyslíkové zhášení je spolu s popsanou luminiscencí jev nutný k funkci systému. Zhášedlo je činidlo, schopné deaktivovat molekulu jiného prvku či sloučeniny z jejího excitovaného stavu prostřednictvím odebrání – v případě PSP – energie.

Molekula se vrátí zpět do základního stavu, aniž by vyzářila foton. V případě PSP je tím zhášedlem kyslík a popsaný jev se projevuje následujícím způsobem: čím větší tlak (množství kyslíku), tím více zhášejících molekul působí na nátěr. Tlak je nepřímo úměrný aktuální intenzitě luminiscence, případně době zhasnutí excitovaných molekul.

Detailní fotofyzikální model je možné podrobně nastudovat v kapitole 2.0 sborníku vydaného v rámci Lecture Series 2001 belgickým institutem mechaniky tekutin Von Karman, kde jeden z průkopníků a kapacit na PSP J.P. Sullivan (Purdue University, USA) publikoval velmi přehledný materiál o TSP a PSP [9].



Obr. 3.1: Jablonského energetický diagram absorpce a emise fotonu luminoforem [10].

3.1.3 Základní vztahy

Rovnice, které ve finále vytvoří základ pro aerodynamické aplikace, vycházejí z energetické bilance procesu excitace, emise a deaktivace molekuly luminoforu. Molekule o energii základního stavu L dodá excitační záření o vlnové délce λ energii

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c_1}{\lambda} \quad (1)$$

Excitovaná molekula s energií L^* dodanou energií buď vyzáří, nebo se jí zbaví ve formě tepla (tento jev se v literatuře nazývá obecně deaktivace). V těchto energetických pochodech, které například [9] uvádí následujícím způsobem (v pořadí pro emisi a deaktivaci)



se vyskytují konstanty k_r, k_{nr} , jejichž význam vyplývá z následující rovnice:

$$\tau_0 = \frac{1}{k_r + k_{nr}} \quad (3)$$

Jednotka pro konstanty k_r, k_{nr} je (s^{-1}), nebo lépe (μs^{-1}), τ_0 je čas, po kterou září luminofor bez přítomnosti zhasědla. Ve výše zmíněných energetických rovnicích se také vyskytuje důležitá veličina λ' , což je vlnová délka luminiscence.

Dále může do procesu vstoupit teplo dodané deaktivací, které způsobí útlum luminiscence. Nebo okolní kyslík, který rovněž způsobí útlum emitovaného záření. Potom se čas, po který září luminofor, vyjadřuje jako

$$\tau = \frac{1}{k_r + k_{nr} + k_q [Q]}, \quad (4)$$

kde konstanta k_q značí přítomnost zhasědla a $[Q]$ je jeho koncentrace.

Přes poměrná množství emitovaného světla bez a se zhasědlem se potom dospěje k jednoduchému vztahu, zvanému Stern-Volmerova rovnice

$$\frac{I_0}{I} = 1 + k_q \cdot \tau_0 \cdot [Q], \quad (5)$$

která a se také vyjadřuje pomocí časů záření luminoforu

$$\frac{\tau_0}{\tau} = 1 + k_q \cdot \tau_0 \cdot [Q]. \quad (6a)$$

Zhášedlem je v aerodynamickém aplikacích převážně kyslík, rovnice se potom vyjadřuje spíše jako

$$\frac{\tau_0}{\tau} = 1 + k_q \cdot \tau_0 \cdot [O_2]. \quad (6b)$$

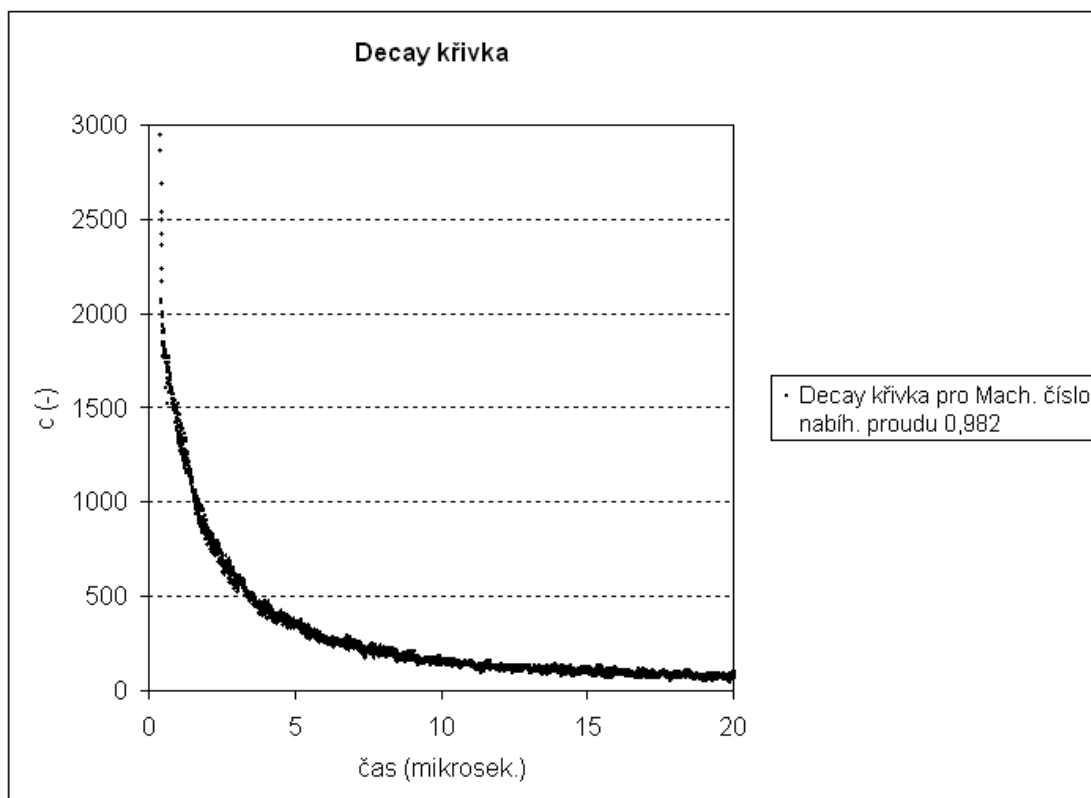
Vzhledem k tomu, že se obtížně získávají hodnoty τ_0 , používají se jako reference hodnoty τ_{ref} a rovnice potom přechází v

$$\frac{I_{ref}}{I} = \frac{\tau_{ref}}{\tau} = A(T) + B(T) \frac{p}{p_{ref}}, \quad (7)$$

neboli v nepřímou úměru mezi intenzitou luminiscence (případně délkou zhášení nátěru) a tlakem kyslíku na povrch opatřený nátěrem s luminoforem.

A, B jsou teplotně závislé materiálové konstanty získávané kalibrací.

S metodou se dá pracovat dvěma rozdílnými způsoby, což již bylo řečeno v úvodu této kapitoly. Toto tvrzení je vyjádřeno v rovnici (7). Při práci metodou *intensity* se Stern-Volmerova vztahu využívá přímo - intenzita emisního záření je zachycována CCD nebo CMOS kamerou. *Lifetime* metoda je založena na zjišťování délky luminiscence a na intenzitě vyzařovaného světla nezáleží jako v případě metody *intensity*. Výsledkem měření takové doby je tzv. decay křivka (křivka zhášení, stmívání), jejíž průběh může vypadat kupř. jako na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Křivka zhasínání luminiscence pořizená při měření v aerodynamickém tunelu „C“ na profilu F8 v místě transonického proudění.

Hodnoty z detekčního přístroje, například z takzvaného fotonásobiče, jsou jednoduše počty napěťových pulzů, odpovídajících počtu fotonů během časového úseku. Protože čas decay, stmívání, je rychlý jev a během tohoto rychlého jevu musí dojít k zachycení a zpracování velkého množství dat (počtu fotonů), jedna taková křivka jako na obrázku 3.2 se získává proměřením jistých dvou až čtyř kratších částí mnoha křivek, statistickým vyhodnocením počtů fotonů ze stejných úseků mnoha (tisíc) křivek a posouváním proměřovaných úseků, jimž se říká okna (windows), od počátku časové osy do konce. Používanému principu se říká časově synchronizovaná detekce.

Lifetime metoda je, nebo přesněji řečeno může být, instrumentálně jednodušší než metoda intensity – použije se již zmíněný fotodetektor - fotonásobič, skenuje se bod po bodu



celá plocha modelu a zaznamenávají se počty fotonů, jež se potom vyhodnocují. Nevýhodou tohoto zjednodušení na druhé straně je, že skenovat model v aerodynamickém tunelu bod po bodu trvá nepoměrně déle než u metody intensity, kdy pro vyhodnocení v ideálním případě stačí jeden snímek z měření.

3.2 PSP: tlakově citlivý nátěr

Existuje velká řada tlakově sensitivních nátěrů. Hlavní tři skupiny zahrnují PSP obsahující porfyrinové sloučeniny s těžkými kovy (kupř. platina, paladium), rutheniové deriváty, pyrenové & perylenové deriváty. Mají různé typy luminiscence a s tím související řádově rozdílné časy odezvy na excitaci i odlišné excitační a emisní délky (podrobně viz např. [11]). Výrazně se liší rovněž v tlakové a teplotní citlivosti, ceně, náročnosti přípravy, rychlosti degradace. To jsou všechno faktory, na které je potřeba brát ohled při výběru nátěru pro daný účel.

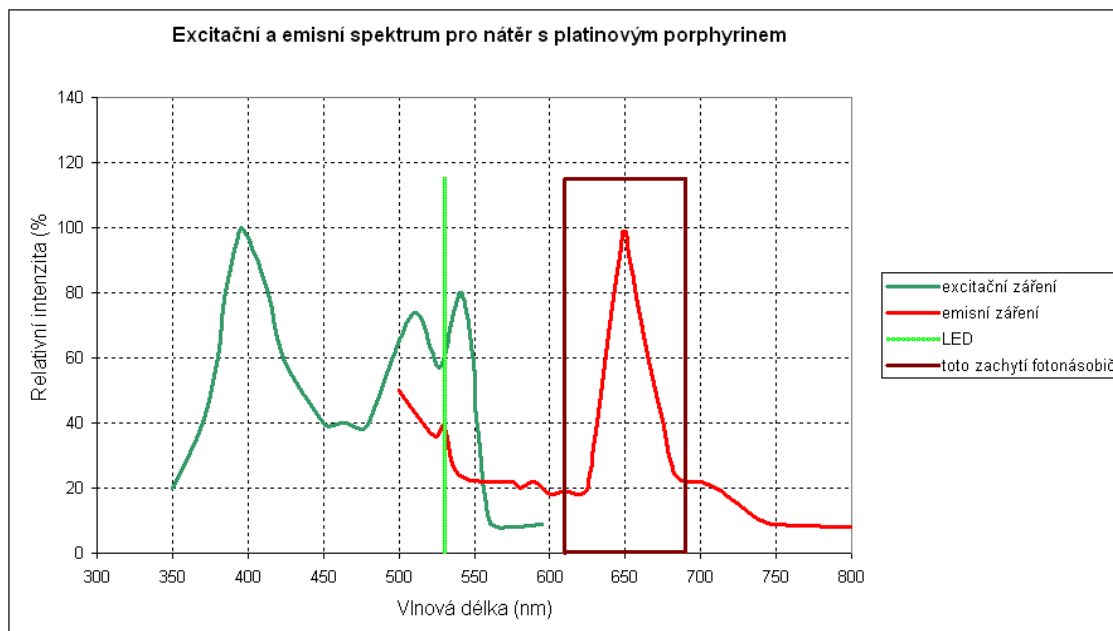
Alan Davies z BAE Systems (další z evropských pionýrů PSP) poskytl VZLÚ recept na jednoduše zhotovitelný porfyrinový nátěr, který je možné si z nakoupených ingrediencí zhotovit i bez vybavení chemické laboratoře, v podstatě pouze s laboratorními váhami a odměrkami. Luminiscenční ingrediencí je porfyrin PtTFPP, jenž se (coby jemný prášek nebo drobné krystalky) vmíchá do laku (s vysokou permeabilitou). Přisype se TiO_2 velmi jemného zrna, nejlépe o velikosti poloviny excitační délky luminoforu (zde platiny). Oxid titaničitý (titanová běloba) tvoří tzv. rozptylovač záření. Vzniklá tekutina rovněž musí obsahovat ředidlo, například toluen.

Nátěr se za pomoci modelářské stříkací pistole nanese ve velmi tenkých vrstvách o tloušťce několika mikrometrů na povrch modelu či vzorku, který bude předmětem zkoumání. Celková vrstva tvoří 30-50 mikrometrů silný povrch. Nátěr je velmi toxický (vzhledem k nepatrnému množství porfyrinu, obsahujícího jedovatý těžký kov, je v první řadě nutno dávat pozor na toluen) a při práci s ním je nutné používat ochranné pomůcky – rukavice, oblek, dýchací masku.

3.3 Detekce

V zásadě se dnes na obě metody PSP používají kamery CCD nebo CMOS (zejména pro nestacionární měření). Fotodetektory pro postupné plošné skenování modelu je možné použít v případě stacionárního měření. Jejich omezená využitelnost při aerodynamickém experimentování je kompenzovaná výrazně menšími nároky na světelný výkon excitačního zdroje a finanční dostupností.

Vhodné zdroje excitačního záření jsou laser, výkonové LED či xenonové lampy. (O kamerách a zdrojích více například v [13] a [14]). Při sestavování optiky je nutné znát excitační a emisní spektrum luminoforu, jak je znázorněno na obrázku 3.3 (níže). Porphyrin se excituje nejochotněji, je-li ozářen UV zářením o vlnové délce 395 nm. Vhodný zdroj excitačního záření v oblasti UV tak, aby vyhovoval všem podmínkám (opticky i elektronicky), je ale nákladná záležitost. Pro představu, UV zdroj s několika milimetrovým zářivým bodem, vhodným pro použití na skenování, se cenově pohybuje v přepočtu okolo sto tisíc Kč. Proto se používá druhý „peak“ z grafu a dostupnější světlo zelené. (Zatímco výkonová LED stojí zhruba sto korun českých, podobná UV LED podobných parametrů stokrát více). Dále, porphyrin vyzařuje nejintenzivněji v oblasti červeného světla (vlnová délka 650 nm). Fotodetektor je nutné opatřit předřazeným pásmovým filtrem, v tomto případě s šíří pásma 80 nm okolo peaku, aby bylo zaručeno, že světlo excitační nebude zaznamenáno a neovlivní výsledek měření. Pro toto snadné optické uspořádání se využívá popsaneho Stokesova posuvu.



Obr. 3.3: Excitační a emisní spektrum pro nátěr s platinovým porphyrinem, energetický schodek mezi maximy na vlnové délce 395 nm u excitačního záření a 650 nm u emisního záření se nazývá Stokesův posuv [15] .

3.4 Náklady na pořízení jednoduchého PSP do laboratoře

Lze pořídit již hotový systém za tři miliony korun. Náklady na malé zařízení, používané ve VZLÚ, jsou řádově nižší. Pořizovací cena jednotlivých součástí je následující (vždy uvedena v měně, ve které byly zakoupeny, součet v eurech):



Tabulka č. 1:

Měřicí karta	MSA 300 Becker & Hickl	€ 4.900
Optická sestava:		
Soustava s LED		30.000,- Kč
Pásmový filtr,		170
Polopropustné		150
Sestava s motory		370
Fotodetektor	H7360-3 Hamamatsu	€ 2.200
Nátěr	PtTFPP – 1g	360
	Lak Dow Corning	2.000,- Kč
Celkem		€ 9.430

V tabulce není zahrnut například spojovací materiál, licence softwaru LabView či samotný PC, což společně s prací jsou nezanedbatelné položky. Předpoklad je, že experimentální pracoviště bude disponovat softwarem a PC, do něhož se vloží karta, dále spojovací materiál lze pouze odhadnout a nepřesáhne hranici několika tisíc korun. Proto po součtu a zaokrouhlení nahoru na celé tisíce Euro a po přepočtu na české koruny je zřejmé, že počáteční investice činí zhruba čtvrt milionu korun. Přes 70% ceny tvoří fotodetektor a rychlá měřicí karta.

4 Měřicí kampaň

4.1 Plán měření

Jedním výsledkem velkého množství testů, které se uskutečnily se záměrem dospět k měření na odtokové hraně, je srovnání dvou odlišných kalibračních metod, „in situ“ a „a priori“.

Další testy měly ukázat, jestli nátěr ovlivňuje proudění okolo modelu či nikoliv – odebíraly se tlaky ze sací strany modelu pokrytého nátěrem a nepokrytého. V tomto případě při vyhodnocení byl použit tlakový součinitel

$$c_p = \frac{P_{stat} - P_{\infty stat}}{0,7 * P_{\infty stat} * M_{\infty}^2}, \quad (8)$$

protože testy proběhly v několika dnech pokaždé pro jiné atmosférické podmínky. (Vstup do tunelu je přímo z atmosféry, vzduch má pokaždé jinou teplotu, jinou vlhkost).

Dále, luminiscenční nátěry mají nevýhodu, že jejich schopnost luminiscence v čase degraduje. To bylo předmětem další menší kampaně, kdy se měřilo s nátěrem čerstvě namíchaným a poté s dva týdny starým.

Měření probíhala v rozsahu celé škály podzvukového stlačitelného proudění od $M_{\infty} = 0,27$ po $M_{\infty} = 0,93$ podle níže uvedených schémat.

4.2 Rozpis testů

a) Nejprve byla provedena tlaková a teplotní kalibrace malého duralového vzorku nastříkaného nátěrem v komůrce s malým objemem podle následujícího schématu (tlakové údaje jsou hodnoty podtlaku) – viz Tab. 2:



Tabulka č.2:

Měření		kalibrace teplotní a tlaková																
	kPa	hodnoty podtlaku																
°C	-85	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

b) Měření v aerodynamickém tunelu bylo provedeno podle následujících schémat:

Tabulka č.3:

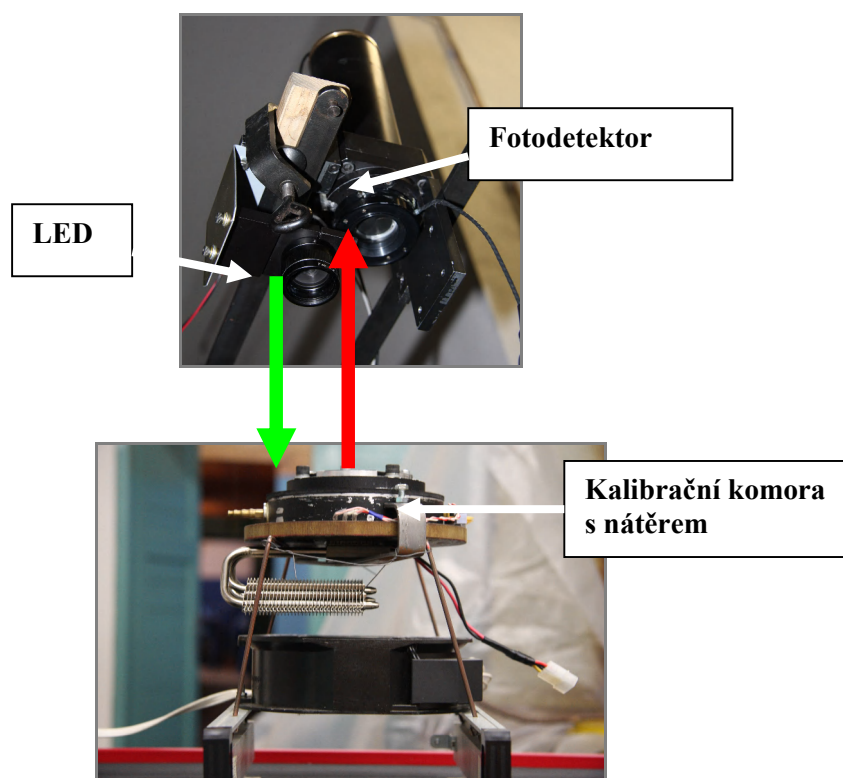
Měření	"prahu" F8 pomocí pneu odběrů a PSP, modelování ve Fluentu													
Režimy														
M (-)	0,27	0,4	0,46	0,52	0,52	0,59	0,67	0,72	0,77	0,82	0,87	0,92	0,93	
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Měření	vlivu stárnutí nátěru na výsledky pomocí PSP													
Režimy														
M (-)	0,27	0,32	0,4	0,46	0,52	0,6	0,67	0,72	0,78	0,82	0,86	0,91	0,93	
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓
Měření	vlivu nátěru na proudění													
Režimy														
M (-)	0,27	0,32	0,4	0,46	0,52	0,6	0,67	0,72	0,78	0,82	0,86	0,91	0,93	
	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓

c) Režimy proudění pro matematické modelování v softwaru Fluent byly nastaveny tak, aby odpovídaly změřeným hodnotám a výsledky byly porovnatelné.

5 Měřicí řetězce, vybavení, software

V následující kapitole je popsáno hardwarové a softwarové vybavení.

5.1 Měřicí řetězec pro kalibraci „a priori“



Obr. 5.1: Schéma optické cesty.

Na výše uvedeném schématu je znázorněna optická cesta od zdroje zeleného excitačního záření přes nátěr po detektor. Jednotlivé komponenty jsou:

- zelená výkonová LED zabudovaná do optiky, která soustřeďuje paprsek do menšího svazku (samotná LED vyzařuje v prostorovém úhlu 60°)
- tlaková komora, s víčkem opatřeným optickým sklem vypočítaným na tlakové namáhání (přesněji na podtlak 90kPa), vybavená dvěma tepelnými odporovými senzory Pt100, natřená



černě; pro účely teplotní kalibrace byl zespodu přimontován Peltierův článek a komora je chlazená vzduchem

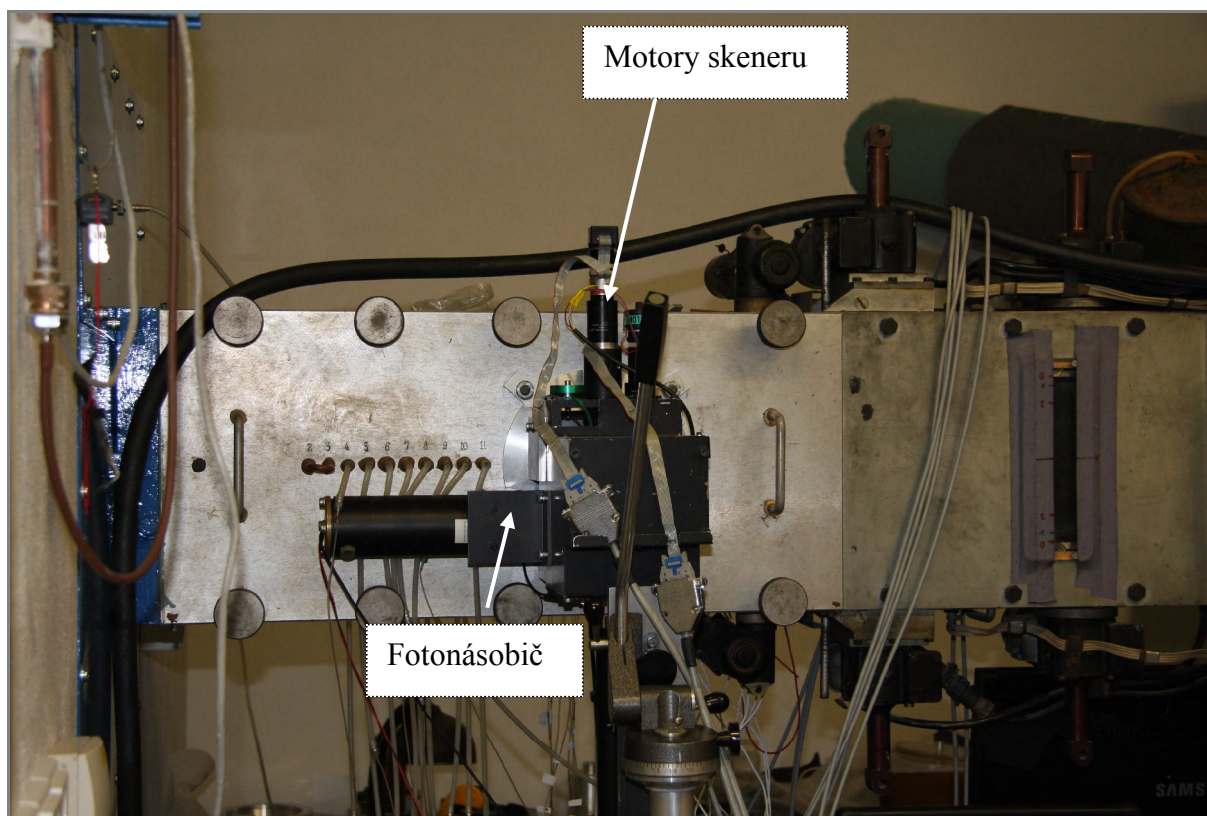
- optické zrcadlo
- fotodetektor - fotonásobič (zde: Hamamatsu H7360-03) s předřazeným pásmovým filtrem, jenž na fotokatodu fotonásobiče propustí světlo emitované nátěrem o vlnové délce pouze $(650\pm 40)\text{nm}$
- OptoDriver z dílny VZLÚ obsahující zdroje, obvody pro spouštění měření, pro termoregulaci atd.
- PC s měřicí kartou MSA300 s čítací frekvencí 200 MHz
- tlak je měřen pomocí kalibrovaného digitálního zařízení Druck (DPI) obsahujícího dva vnější snímače o rozsahu 40 a 100 kPa a vnitřní snímač atmosférického tlaku
- software dvojího druhu: software vytvořený v LabView upravený pro potřeby tohoto měření a originální software doporučený výrobcem karty

5.2 Měřicí řetězec pro měření v aerodynamickém tunelu

Pro úvodní testy bylo použito následující vybavení:

- transonický aerodynamický tunel s přerušovaným chodem, s měřicím prostorem 118 x 118 mm a perforovanými stěnami, v oblasti měřicího prostoru vybavený průhledem obsahujícím optické sklo BK7, s možností měření v celém rozsahu podzvukových až transsonických rychlostí. Vstup do tunelu je atmosférický, maximální Reynoldsovo číslo 300 000.
- duralový vrtulový profil F8 v konfiguraci „práh“ (podrobněji viz kapitola 5.2.1) natřený šedou podkladovou barvou a tlakově citlivým nátěrem, opatřený sedmi klasickými tlakovými odběry a dvěma teplotními čidly Pt100 umístěnými 1 mm pod povrchem profilu
- fotonásobič Hamamatsu H7360-03 jako v případě kalibrace opatřený pásmovým filtrem; optická cesta tvořená soustavou zrcadel (polopropustné zrcadlo a dvě optická zrcadla, jedno pohyblivé ve dvou osách pomocí motorů Maxon), LED, kolimátor
- OptoDriver

- PC s měřicí kartou MSA300
- Software vytvořený v LabView



Obr. 5.2: Měřicí prostor aerodynamického tunelu se systémem pro PSP měření.

5.2.1 Model, teplotní měření na modelu

Vrtulový profil F8 je upevněný na průhled podle obrázku 5.4. Při tomto uspořádání je tlaková strana vyřazena z měření. Zůstává strana sací s naneseným nátěrem a model se spíše než 2D profil nazývá „práh“.

Tato konfigurace byla zvolena pro celkovou konstrukční jednoduchost; zejména optická cesta nevyžadovala náročnější úpravy. Na jednu bočnici tunelu byl připevněn průhled s modelem s tlakovými odběry a teplotním měřením, na druhou stranu optický skenovací systém.



Model je vyroben z duralu a na sací straně je vybaven sedmi otvory o průměru 0,8 mm, které zajišťují odběry statického tlaku z povrchu modelu. Ty jsou pomocí měděných trubiček vyvedeny mimo model a mimo měřicí prostor. Odběry statického tlaku slouží jako reference při porovnávání měření a matematického modelování, při srovnání metody měření s nátěrem kalibrovaným metodou a priori, tedy v kalibrační komoře a metodou in situ, čili při chodu tunelu.

Měření odběry a optické měření se vyřešilo poměrně snadno. Jako složitější se ukázalo měření teploty. Nátěr, jak bylo popsáno, je teplotně citlivý. Při měření vzniká na povrchu modelu teplotní rozdíl (model je obtékán proudem o vysoké rychlosti M_∞ , která ještě okolo modelu roste, zároveň se mění další stavové veličiny v proudě).

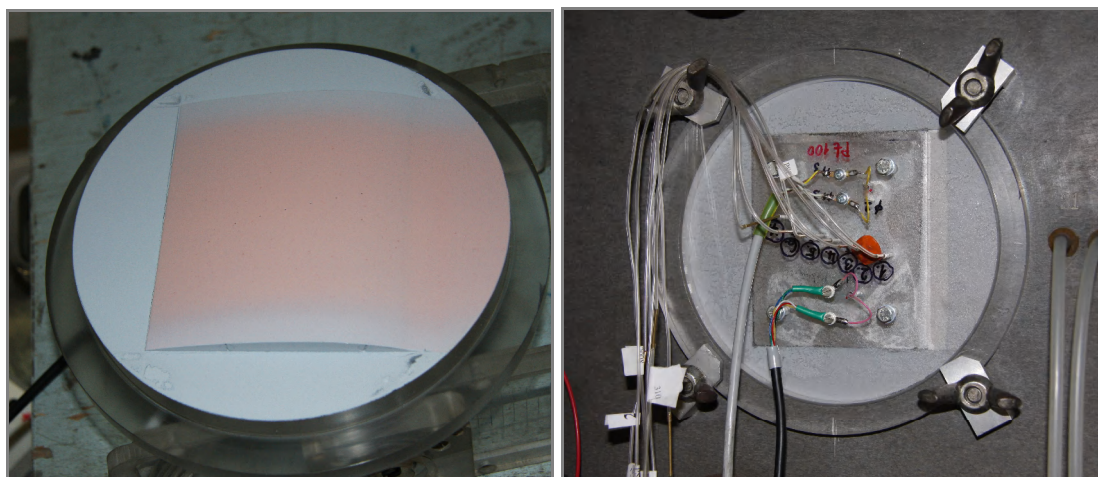
V této souvislosti je potřeba se zmínit o rázové vlně. Ta se na modelu vytvořila poté, co M_∞ překročilo hodnotu 0,8. Než vlna doputovala na konec profilu (jak se v průběhu testů zvyšovala rychlost M_∞), vyskytovala se mezi pneumatickými odběry. Za vlnou dojde ke zvýšení tlaku a teploty, (pokles teploty v průběhu po profilu je tedy zastaven), takže oproti primárně umístěnému teplotnímu čidlu (u druhého odběru statického tlaku, čili blízko náběhu) nevzniká na profilu tak zásadní tlakový rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší teplotou – až do okamžiku, kdy se ráz při nejvyšších rychlostech dostane na konec profilu, místní Machova čísla na profilu překročí rychlost zvuku a tlakový i teplotní spád na profilu bude velký.

Podle toho, jak vypadá průběh statického tlaku po profilu (z předchozích měření) se rozhodlo, že druhé teplotní čidlo se umístí ke třetímu odběru. Tím se mělo zajistit, že pro plánované režimy měření bude podchycen největší teplotní rozdíl. Nicméně je potřeba počítat s faktem, že teplota je měřena 1 mm pod povrchem – a nikoliv na povrchu modelu. To má na průběh měření značný vliv.

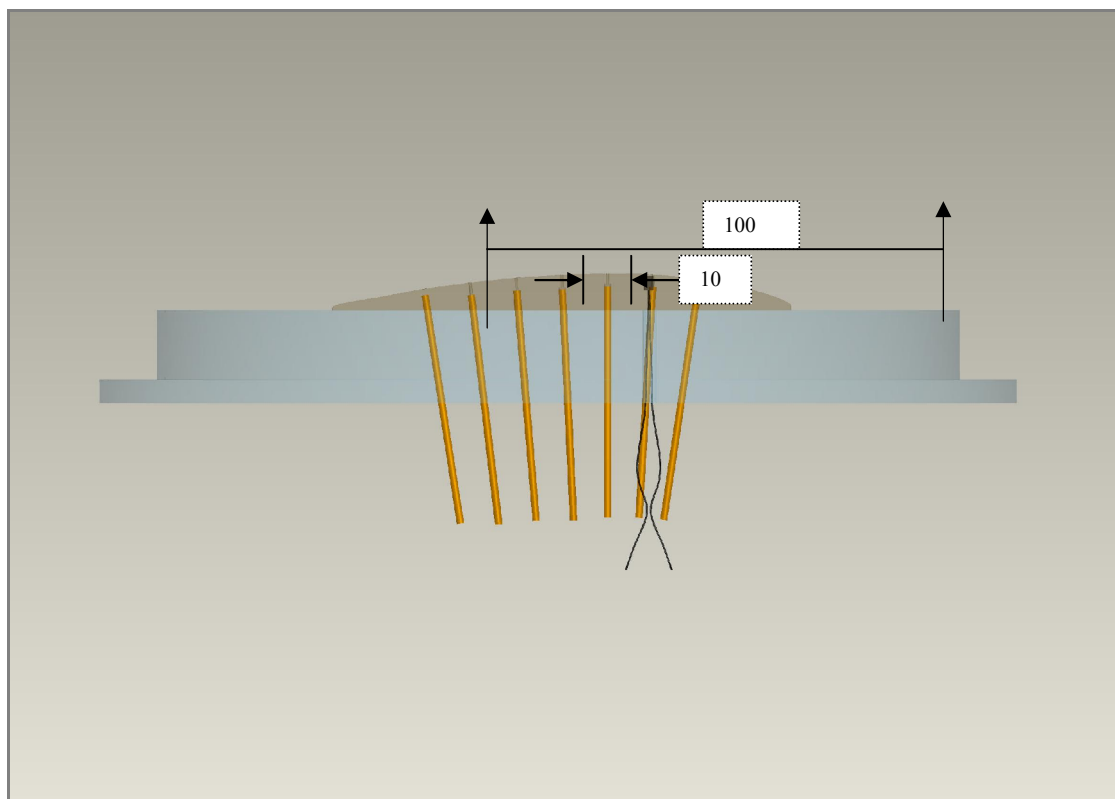
Z měření bylo zřejmé, že vrstva duralu mezi obtékanou plochou a samotným čidlem byla stále velká. I přes relativně velkou tepelnou vodivost duralu docházelo k ustálení teploty až po proudění trvajícím řádově desítky sekund až minuty. Takto dlouhá měření nebylo možné provádět; přestože měřicí prostor je malý a zásoba tlakového vzduchu velká, pro vyšší

Machova čísla požadavku minutových měření nedostojí. (Minutu by trvalo ustálení teploty; skenování modelu tak, jak je nastaveno pro tuto práci, čili několik diskrétních bodů od náběžné hrany po odtokovou, probíhá ve dvou etapách a celkově zabere – vzhledem k některým nedostatkům měřicího programu, které se zatím nepodařilo odladit – téměř další minutu. Dohromady potom téměř dvě minuty, což je doba, během které podtlak v tlakové nádobě klesne z 60 kPa na 40 kPa a parametry nabíhajícího proudu se změni).

Výhodnější by bylo umístit čidlo na povrch modelu, což se zatím nepodařilo uspokojivě vyřešit.



Obr. 5.3: *Vlevo nátěrem nastříkaný profil upevněný na průhledu, vpravo průhled umístěný na boční stěně aerodynamického tunelu.*



Obr. 5.4: Model s konfigurací odběrů a teplotním snímačem Pt100 u druhého odběru. Druhý teplotní snímač byl umístěn u vedlejšího – třetího – odběru.

5.2.2 Tlaky

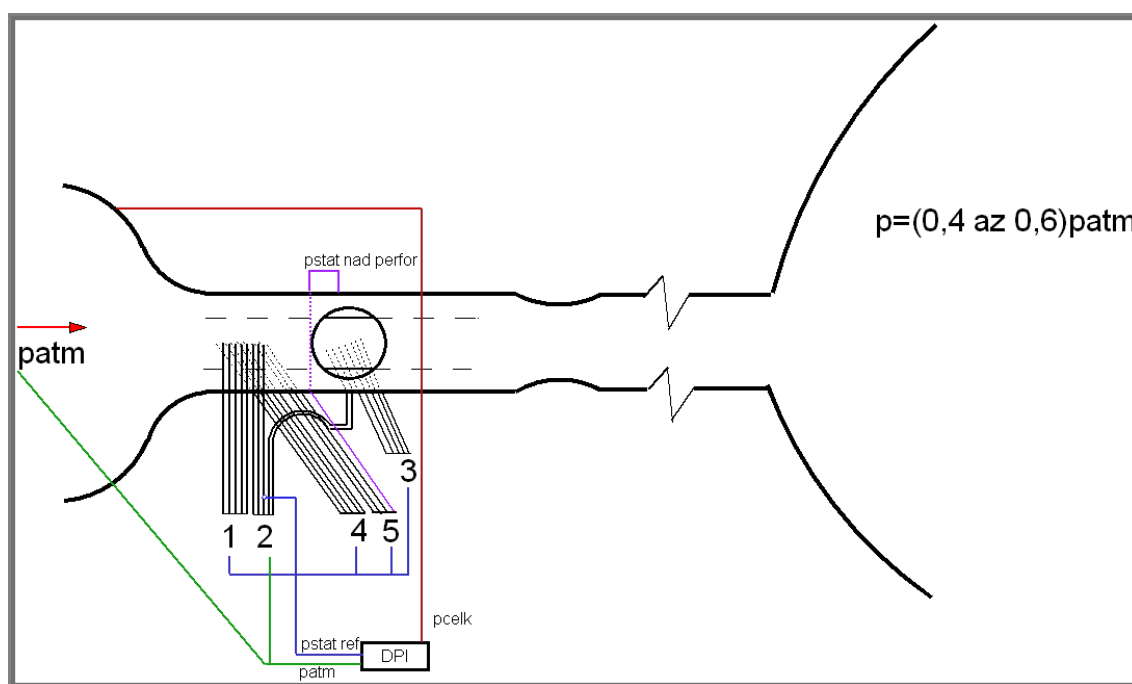
Tlakové měření je provedeno polovodičovými snímači diferenčního tlaku Scanivalve o rozsahu 70 kPa a dále kalibrovaným měřidlem Druck s vnitřním čidlem pro atmosférický tlak a snímači o rozsazích 40 kPa a 100 kPa. Snímače Scanivalve jsou připojeny na tlakové přepínače.

Celkově je na modelu vytvořeno sedm odběrů statického tlaku (jak je vidět na obr. 5.4.), měřené tlaky jsou odvedeny trubičkami ke snímačům. Na obr. 5.5 je nakresleno schéma zapojení tlaků. Kromě sedmi tlaků jsou zde připojeny i tlaky ze stěn, sloužící k proměřování parametrů tunelu, to ovšem není předmětem této práce. Dále je snímán celkový tlak na

vstupu (k vyhodnocování M_∞ a koeficientu c_p) a statický tlak v prostoru nad perforací pro účely matematického modelování.

Jako protitlak (ke snímačům) byl vybrán jeden statický tlak ze stěny, jenž je měřen i na jednom ze snímačů na přepínači (zde je protitlakem atmosférický tlak) a dále na snímači v DPI o rozsahu 1 bar.

Napětí v milivoltech ze snímačů jsou vedena dále na úpravu signálu (zesilovač) Dewetron, která slabé signály zesiluje dvacetkrát. Sem je přiváděno i napětí z teplotních snímačů (v tomto případě je signál zesílen desetkrát). Schéma zapojení tlaků na snímače Scanivalve (označené 1 až 5) a na DPI viz následující schéma.

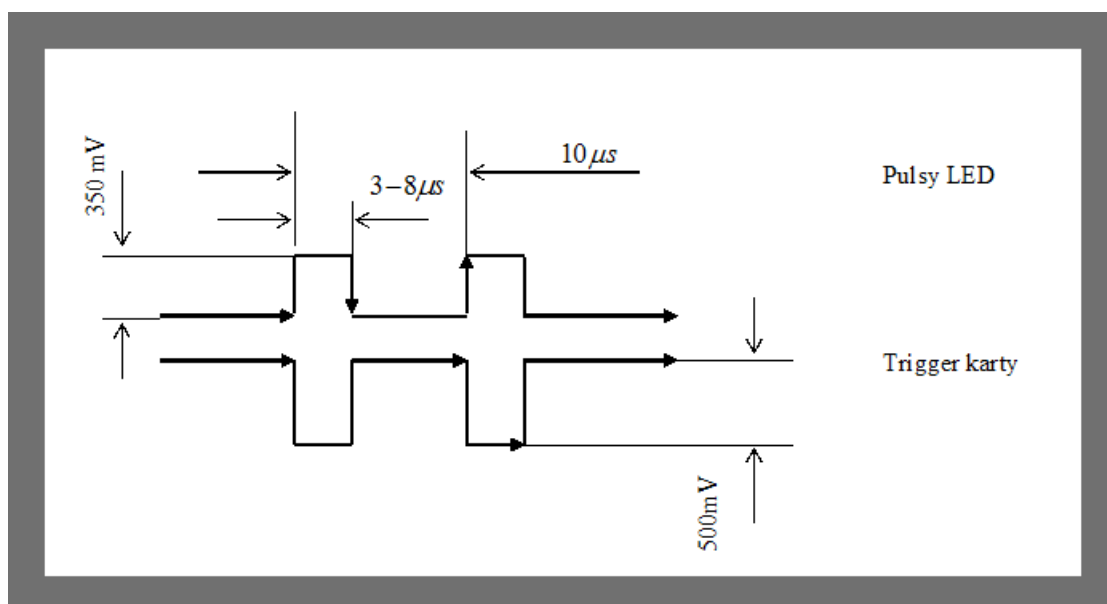


Obr. 5.5: Schéma zapojení tlaků v tunelu a na modelu.

5.2.3 Optika

Vyzařované fotony zejména červeného spektra viditelného záření jsou zachycovány fotodetektozem – fotonásobičem – značky Hamamatsu. Výstupem z fotonásobiče jsou

napěťové pulsy ve velmi vysoké frekvenci, k čemuž je uzpůsobena rychlá měřicí karta Becker nad Hickel schopna zachycovat s frekvencí 200MHz. Karta rovněž obsahuje vstup pro spouštění měření – to se uskutečňuje přímo z napěťových pulsů LED diody. Je možné nastavit několik parametrů: spouštění na náběžné hraně, na sestupné hraně pulsu z LED a úroveň napětí, kdy má karta začít měřit. Toto konkrétní zařízení bylo nastaveno způsobem, jaký objasňuje obrázek 5.6:



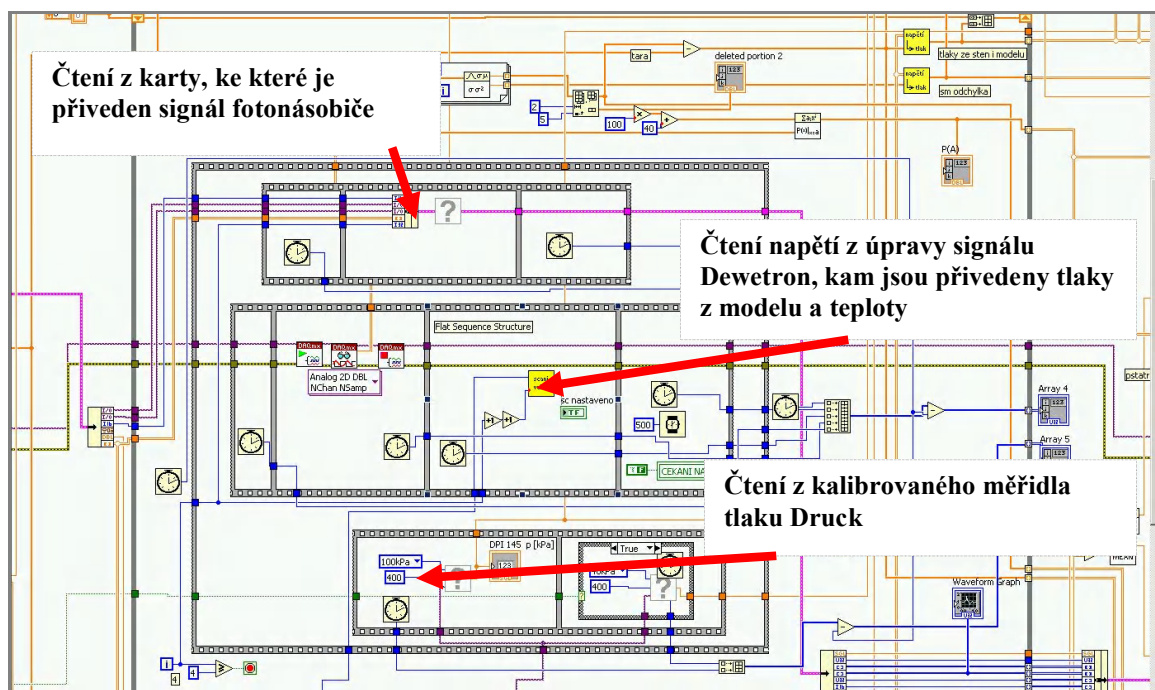
Obr. 5.6: Schéma zobrazuje průběh napájecího napětí LED diody, který je potřeba pro správné osvětlení nátěru; v okamžiku, kdy zhasíná LED, se spouští karta.

Optické cestě je potřeba v této fázi vývoje věnovat speciální pozornost. Původní zařízení dodané do VZLÚ mělo vyvinuté skenovací zařízení, jehož umístění na aerodynamický tunel bylo snadno řešitelné: cesta excitačního záření je řešena systémem zrcadel a polopropustných filtrů, přičemž jedno ze zrcadel je natáčeno dvěma motory, aby bylo možné zrcadlem pohybovat ve dvou osách a skenovat plošně povrch modelu. Stejnou cestu, jako fotony excitujícího záření, absolvují i fotony emitovaného záření z nátěru.

Vzhledem k jejich jiné vlnové délce stačí fotonásobič vybavit filtrem propouštějícím pouze světlo kolem 650 nm vlnové délky a je zaručeno, že zelené světlo LED neovlivní výsledné decay křivky.

5.2.4 Software

Na úpravě signálu je obsazeno celkem sedm modulů. Všechny jsou snímány na jedné šestnácti kanálové kartě National Instrument. Napěťové pulsy z fotonásobiče jsou přivedeny na speciální rychlou měřicí kartu, jak již bylo uvedeno výše. Obě karty jsou čteny pomocí programu sestaveném v grafickém programovacím prostředí LabView. Zároveň je zde naprogramováno ovládání přepínače pro tlakové snímače Scanivalve a pohyb motorů optického scanneru.



Obr. 5.7: Ukázka blokového schématu měřicího programu v LabView – zde sekvence, kde jsou čteny karty.



Program obsahuje přepočet napětí na tlaky a teploty podle vložených kalibračních rovnic a zaznamenává decay křivky. Také ukazuje a zaznamenává hodnotu Machova čísla proudu nabíhajícího na model, které je počítáno z celkového tlaku ve vstupu do tunelu a statického tlaku ze stěny. Výstupem z programu je několik souborů: hodnoty tlaku na modelu (a stěnách tunelu), decay křivky a soubor s Machovým číslem, teplotami, hodnotami netárovaných tlaků (ještě před kalibračními rovnicemi, čili napětí) a hodnoty táry (rovněž napětí).



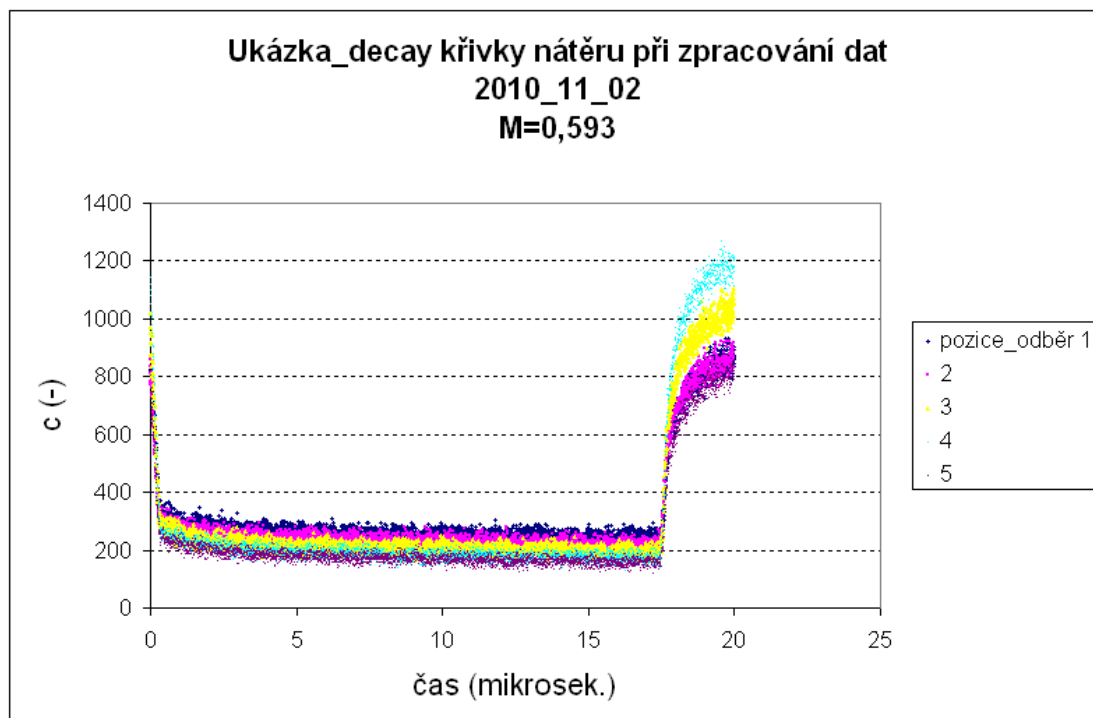
6 Zpracování dat

Následný postprocessing má několik fází. Decay křivky musí být zpracovány na výsledné konstanty jednotlivých exponenciálních křivek, což se děje za pomoci samostatného programu využívajícího Marquardt-Levenbergův algoritmus pro řešení nelineárních průběhů.

Nejprve se jednotlivé křivky nechají vykreslit například v excelu, aby bylo zřejmé, jak byly zaznamenány. Podle průběhu se přesněji nastavují časy, mezi kterými má být každá křivka zpracována. Zpravidla jsou hodnoty stále stejné, minimálně pro měření z jedné kampaně, a pohybují se okolo 0,5 mikrosekundy (začátek) do 15 mikrosekund (konec křivky).

Výsledné konstanty jsou pak přiřazovány statickým tlakům. Toto se může provést dvěma způsoby: jednou se porovnají naměřené konstanty s tlaky odebranými na stejných místech a určují se tlaky neznámé (metoda „in situ“), podruhé se podle předem provedené kalibrace vypočítají tlaky z kalibračních křivek (metoda „a priori“).

Je nutné na tomto místě uvést, že fáze zpracování dat není zdaleka hotová, jednotlivé etapy nejsou zautomatizované a zpracování i krátkého měření trvá dlouho, podle aktuální potřeby je využito několik softwarů (zejména Excel, podprogramy v LabView). Této problematice, stejně jako problematice podrobného vyhodnocení nejistoty, nemohl být zatím věnován souvislý čas. V momentě, kdy bude určena neměnná metodika, například pro měření lopatkové mříže, bude možné věnovat úsilí i vývoji komplexního softwaru pro zpracování dat.



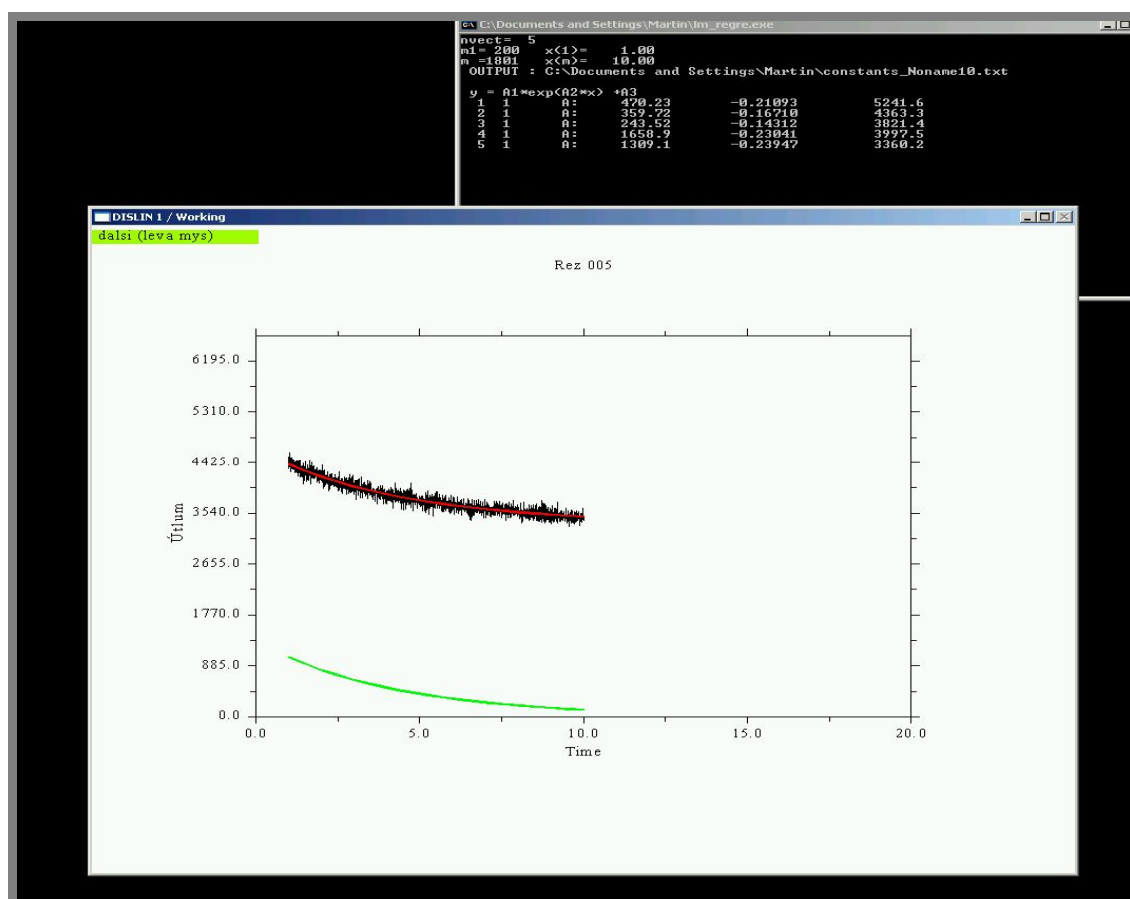
Obr. 6.1: Vykreslené decay křivky při zjišťování, jaký čas (osa x) se má nastavit pro postprocessing. V tomto případě bude dobré zachovat co největší část na začátku (ještě proložitelnou danou rovnicí) a nechat zpracovat co nejdelší část až po 15 mikrosekund.

Nejdůležitější částí fáze zpracování dat je již zmíněný proces, při kterém dochází k vyhodnocení křivek. Metoda „lifetime“ není přímo závislá na počtu fotonů, jež přijme fotodetektor, ale na průběhu křivky. Program má několik nastavitelných parametrů: začátek a konec křivky, jež bude následně zpracována (určí se čas, zpravidla se odřezává 0,5 mikrosekundy začátku křivky a konec nejlépe na 15 mikrosekundách) a volitelný počet konstant, jež křivku určují. Výsledné rovnice křivky jsou následující:

$$\begin{aligned}y(t) &= A1 * e^{A2*t} \\y(t) &= A1 * e^{A2*t} + A3 \\y(t) &= A1 * e^{A2*t} + A3 + A4.\end{aligned}\tag{9a, b, c}$$



Zpravidla se používá rovnice se dvěma konstantami A1 a A2; A2 jako exponent je hledané $-1/\tau$, čas zhasnutí náteru.



Obr. 6.2: Ukázka z uživatelského prostředí ze softwaru na zpracování decay křivek.

7 Matematické modelování - Fluent

Naměřené výsledky byly konfrontovány s numerickým výpočtem v softwaru Fluent.

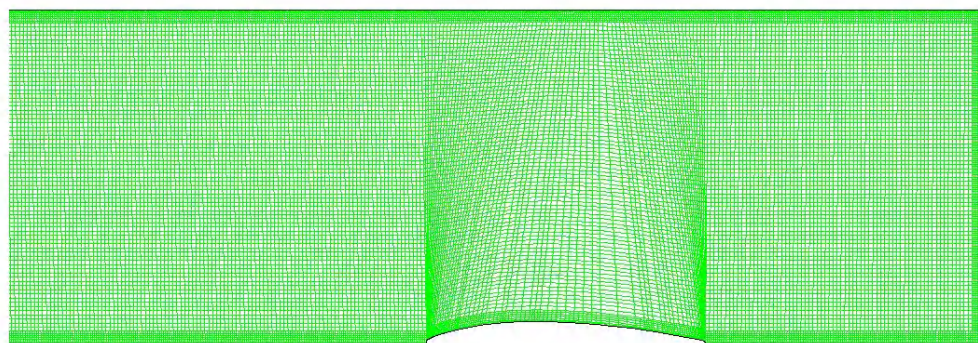
7.1 Fyzikální a matematický model

Vzhledem k jednoduchosti konfigurace „prahu“ na stěně tunelu byl v Gambitu vytvořen zjednodušený model problému – kanál s pevnými rovnoběžnými stěnami a prahem. Geometricky byly dodrženy základní proporce ve shodě s předlohou, tedy šířka kanálu, délka kanálu před prahem, délka kanálu za prahem před škrťacím hrdlem a samotná geometrie prahu. Reálný kanál je čtyřstěn, kde stěna s prahem a protilehlá stěna jsou plné (z převážné části duralové) a zbylé dvě stěny jsou perforované. Vzhledem k tomu, že se rovněž měřil statický tlak v prostoru za perforací (viz schéma zapojení tlaků na obr. 5.6 a pneu odběr označený *pstat nad perfor*) a po porovnání se statickým tlakem nabíhajícího proudu bylo zřejmé, že se tyto dva tlaky liší o maximálně 800 Pa při nejvyšších Machových číslech, zjednodušil se 3D případ na 2D.

Okrajové podmínky byly zvoleny následující: stěny („wall“) a tlakový vstup a výstup („pressure inlet“ a „outlet“). Počáteční podmínky byly jednoduše zadávány podle hodnot naměřených při experimentu, a to: celkový tlak v konfuzoru a statický tlak ze stěny tunelu, kde se již předpokládá ustálené proudění nabíhající na model.

Matematický model vychází z předpokladu stacionarity a turbulence problému. Je tvořen termodynamickými vztahy pro ideální tekutinu, soustavou zákonů zachování hybnosti (rovnice Navier-Stokesovy), energie, hmoty (rovnice kontinuity) a 2-rovnicovým modelem turbulence k-omega (varianta SST, podle [12] vhodná pro výpočet smykového proudění v blízkosti obtékaných stěn). Numerická simulace ve Fluentu je založena na využití statistických modelů turbulence (vycházející z Reynoldsova středování veličin turbulentního proudění a následného středování bilančních rovnic; místo transportních rovnic pro Reynoldsova napětí, jež se po aritmetických úpravách středovaných rovnic v nich objeví a jejichž řešení je značně složité, se použijí modely turbulence, vyvinuté pro fyzikálně konkrétněji specifikovanou oblast proudění).

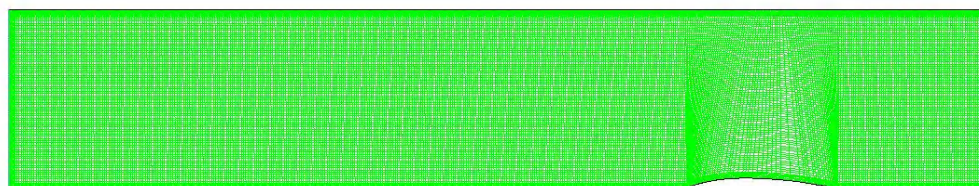
Původní model je tvořen soustavou nelineárních parciálních diferenciálních rovnic. Numerické řešení ve Fluentu stojí na řešení soustavy rovnic, jež jsou na diskrétních konečných objemech převedeny na algebraické. Objemy vycházejí ze strukturované sítě, jež je v tomto konkrétním případě tvořena čtyřúhelníky, celkový počet elementů přesahuje hranici 60 000. (Samotný model pokrývá 140 uzlů). V mezní vrstvě je síť zhuštěna.



Grid

Jun 01, 2011
FLUENT 6.1 (2d, dp, segregated, lam)

Obr. 7.1: Obrázek představuje detail výpočtové sítě v softwaru Fluent v okolí „prahu“; v mezní vrstvě je síť zahuštěna.



Grid

Jun 01, 2011
FLUENT 6.1 (2d, dp, segregated, lam)

Obr. 7.2: Celá výpočtová síť.

8 Výsledky

8.1 Kalibrace „a priori“ a „in situ“

8.1.1 Kalibrace a priori

Jako první byl testován postup s kalibrací ve speciální kalibrační komoře, která byla popsána výše. Měřilo se podle uvedeného kalibračního schématu (viz tabulka č.2). To mimo jiné obnášelo hledání teploty (čili napájení Peltierova článku), která byla po dobu sběru dat pro jednu kalibrační křivku stálá. Teplota v kalibrační komoře byla snímána na povrchu vzorku a v jeho okolí a za úspěšné měření bylo považováno takové, kdy v průběhu snímání kolísala méně než o $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$.

Měření potom bylo zpracováno běžným způsobem, který byl popsán v kapitole 6.

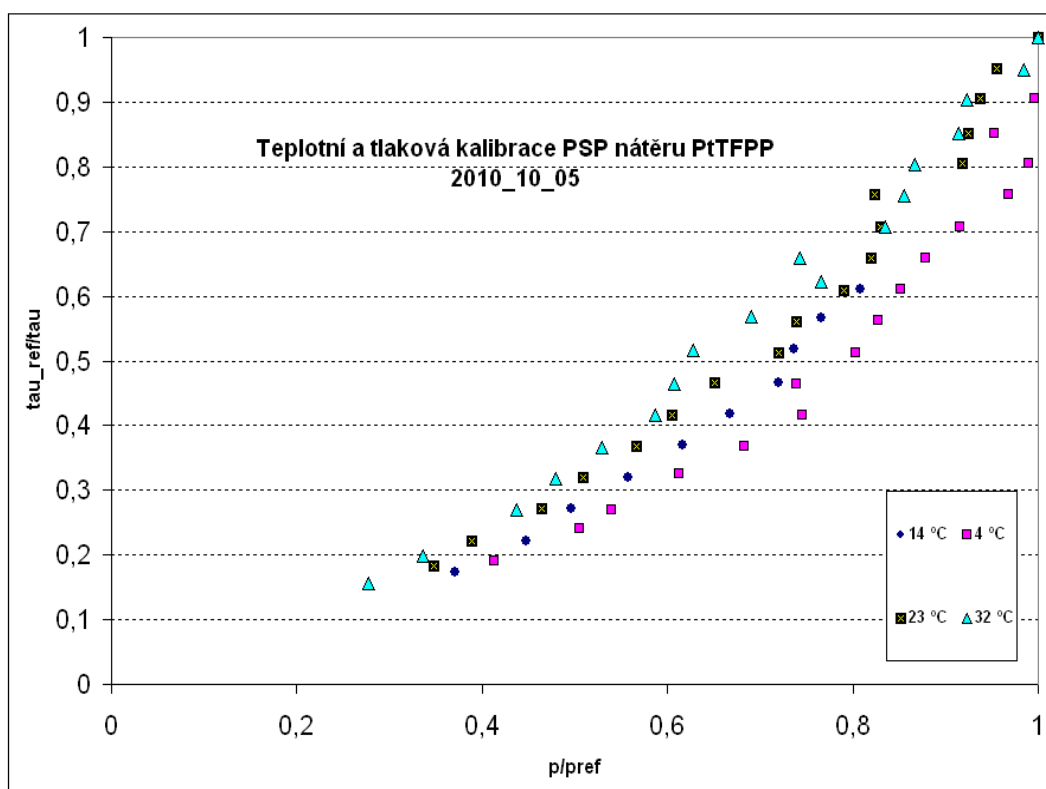
Křivky, jak již bylo uvedeno výše, jsou nelineární a prokládají se exponenciální rovnicí $y(t) = A1 * e^{A2*t}$, (přesněji, zde bylo prokládáno křivkou $y(t) = A1 * e^{A2*t} + A3$, pouze budiž řečeno, že konstanta A3 nemá v tuto chvíli význam), kde konstanta A2 obsahuje hledaný čas τ (označovaný také jako „tau“) zhasnutí emitovaného záření (přesněji ve tvaru $\frac{-1}{\tau} [\mu\text{s}^{-1}]$).

Měření proběhlo pro několik teplot. V komoře se nastavila teplota a vyčerpál se vzduch až do hodnoty podtlaku zhruba -85 [kPa] . Nátěr se exponoval excitačním zdrojem a snímalo se emitované záření. Poté se mírně připustil vzduch o 5 [kPa] a opět se exponoval nátěr a znovu snímala odezva, vše zároveň se snahou dodržet stejnou teplotu jako na začátku. Tímto způsobem se pokračovalo až do atmosférické hodnoty tlaku. Tlaková a teplotní kalibrace PSP nátěru tedy znamená, že je zaznamenáno a vyhodnoceno několik tlaků od hodnoty -85 [kPa] podtlaku do 0 [kPa] podtlaku při jedné teplotě v kalibrační komoře.

Samotná křivka je potom vynesena v poměrech $\frac{\tau}{\tau_{ref}} \approx \frac{p_{ref}}{p}$, kde konstanty A, B

získáme, pokud body proložíme lineární regresí. Čím vyšší hodnoty podtlaku, tím delší doby zhasínání luminiscence.

Z grafu je znát nelinearita nátěru, která potvrzuje závěr chemického zkoumání, že nátěr s platinovým porphyrinem je vhodnější k použití ve vyšších rychlostech ([7]) (pro jeho horší vlastnosti při nízkých podtlacích).



Graf 1: Kalibrační křivky tlakově citlivého nátěru pro různé teploty (ty jsou vyznačeny v legendě). Na osu x je vynesena poměr tlaků (reference je atmosférický tlak), na osu y poměr dob zhasínání nátěru. Nátěr se od poměru tlaků 0,5 směrem k vyšším tlakům projevuje silně nelineárně a pro použití při nižších rychlostech je méně vhodný.



8.1.2 Testování PSP – metoda in situ

Výsledky metody „a priori“ jsou použitelné pouze v úzkém rozsahu teplot. Chlazení Peltierova článku vzduchem tak, jak je vyřešeno v kalibrační komoře popsané výše, nižší teploty neumožňuje (přesněji, ochladí vzduch o 20 K oproti teplotě okolí), proto se přistoupilo k testování metody „in situ“. V praxi to znamená, že se provedou klasické tlakové a optické odběry ze stejných míst, tzv. kalibrace se provede porovnáním těchto dvou údajů a doplní se neznámé tlaky k optickým odběrům v místech bez trubiček.

Tato metoda je obecně jednodušší a používanější (je rychlejší, jako její nedostatek bývá udávána menší přesnost než u metody „a priori“). Pro další používání metody „in situ“ je ale potřeba úspěšně vyřešit teplotní měření na profilu jiným způsobem, než bylo popsáno výše.

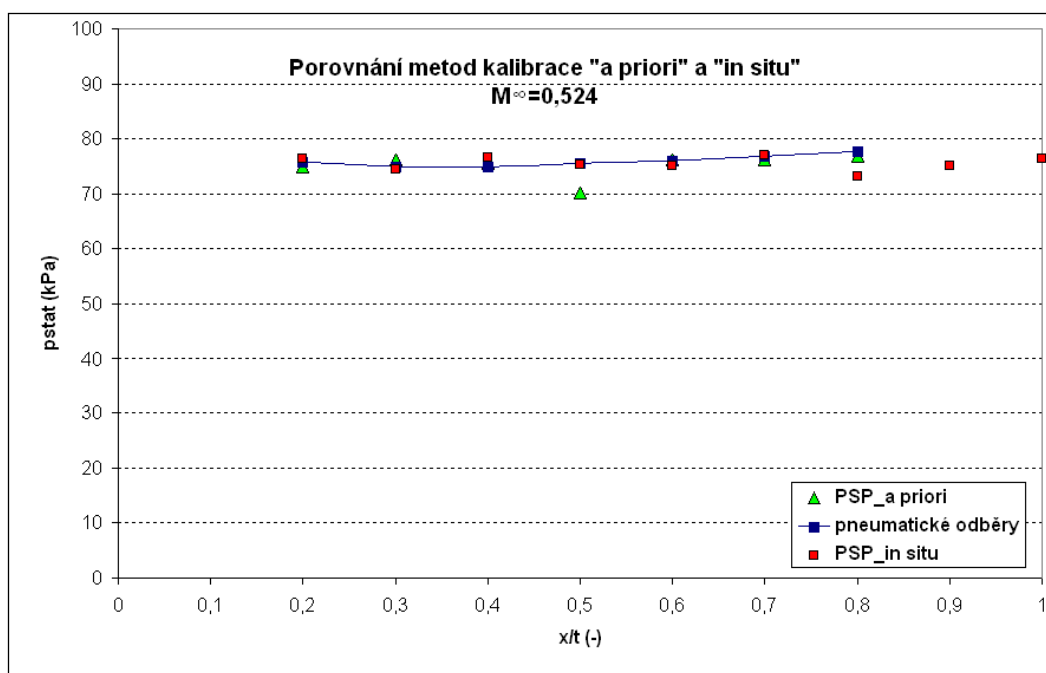
Jako referenční podmínky se vzaly takové, které byly naměřeny bez chodu tunelu (v zahraničních člancích je používán termín *off-wind*) a poměřeny s aktuálními hodnotami získanými za chodu tunelu (*on-wind*).

8.1.3 Výsledky měření

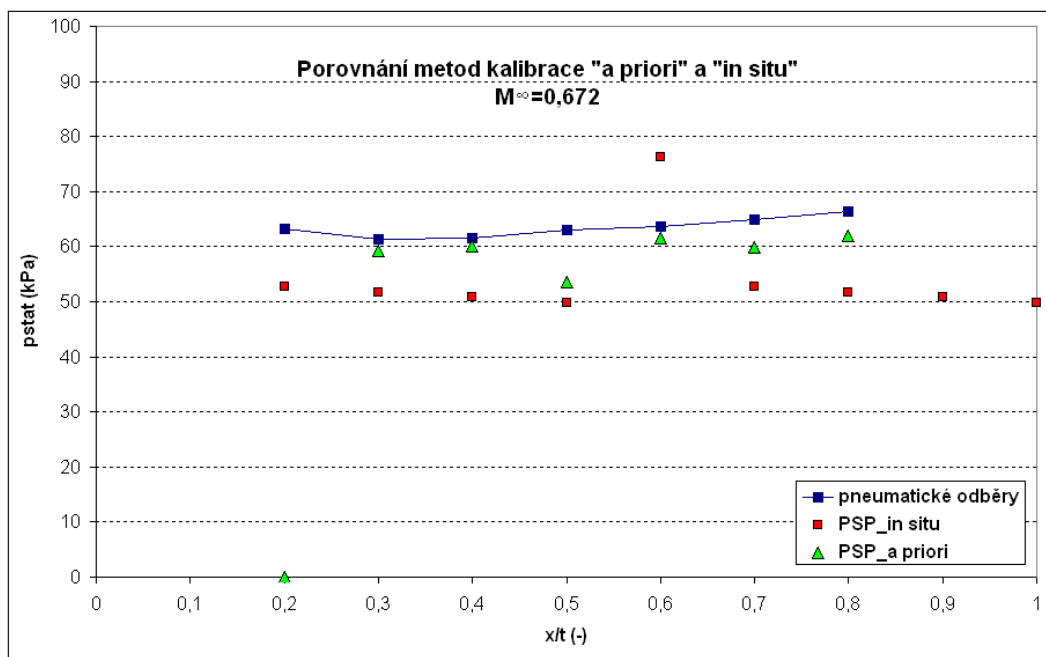
V průběhu samotného měření na modelu „prahu“ se postupovalo následujícím způsobem: snímaly se tlaky pomocí pneumatických odběrů a ve stejný okamžik se skenoval povrch modelu opticky na stejných místech.

Z měření do zpracování dat postupují 2 soubory: klasické tlakové odběry a ve stejných místech snímané emitované (a slábnoucí) záření. Z decay křivek jsou získány konstanty, které se postaví vedle tlaků z pneumatických odběrů. V tomto okamžiku chybí jediná veličina – teplota. Rozhodlo se, že pro tuto první sérii pokusů se teplota pod povrchem použije.

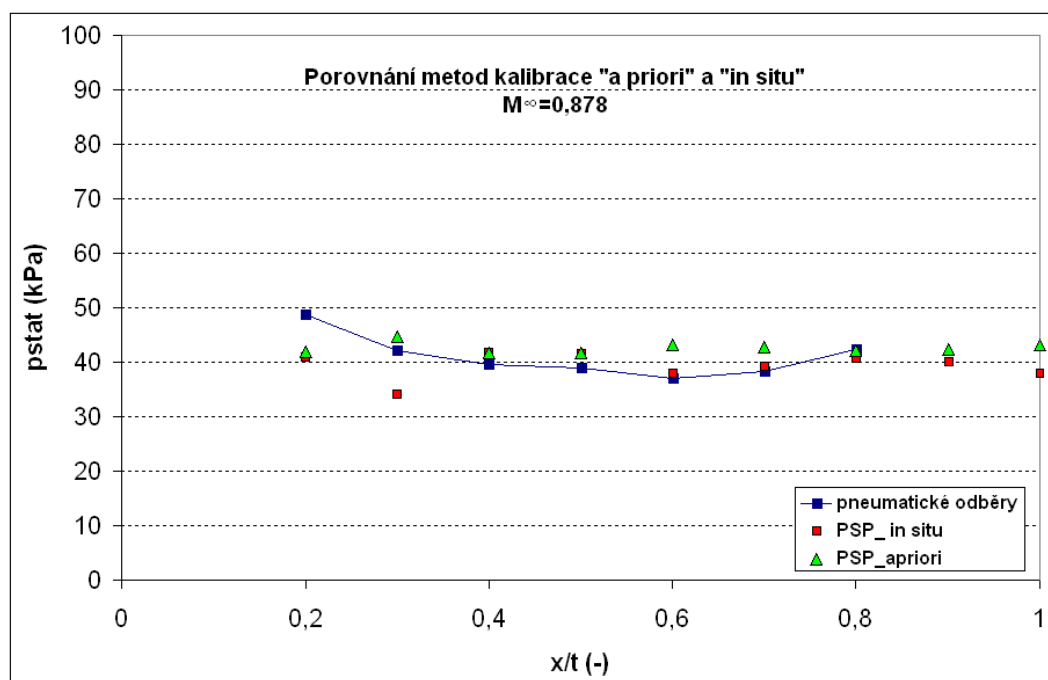
Na následujících čtyřech grafech jsou porovnány výsledky ze dvou měření, přičemž měření PSP je zpracováno dvěma výše popsanými způsoby. V měření se posléze vyskytovaly výsledky, které zcela vybočovaly z reality i průměru – takové byly vypuštěny.



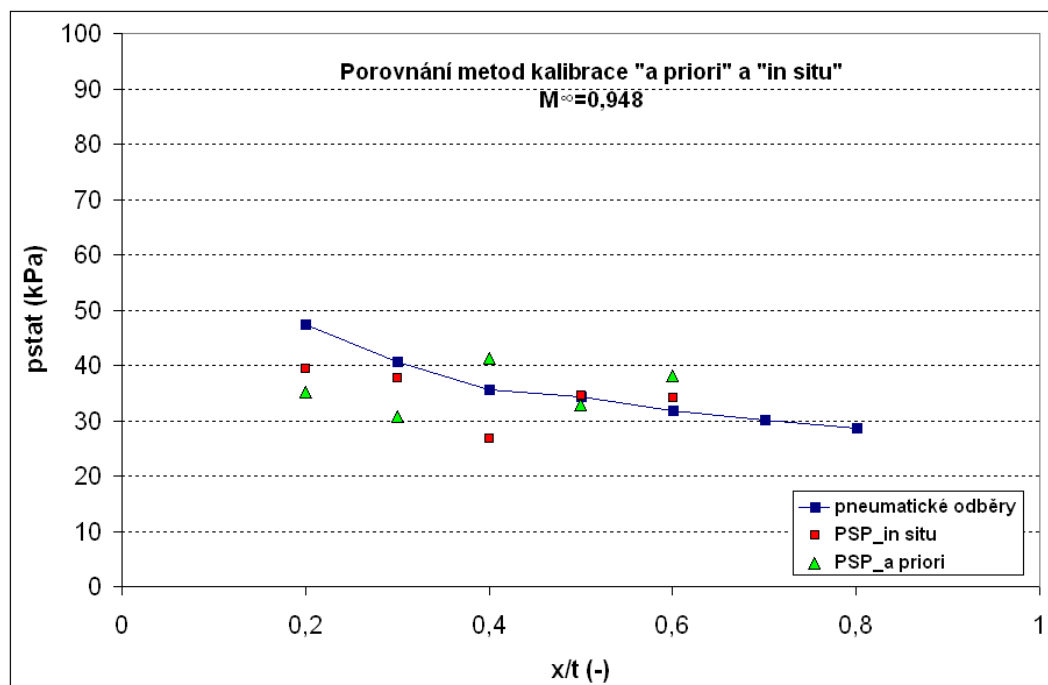
Graf 2: Porovnání vyhodnocení PSP metodou „in situ“ a „a priori“ pro režim $M_{\infty} = 0,524$.



Graf 3: Porovnání vyhodnocení PSP metodou „in situ“ a „a priori“ pro režim $M_{\infty} = 0,672$.

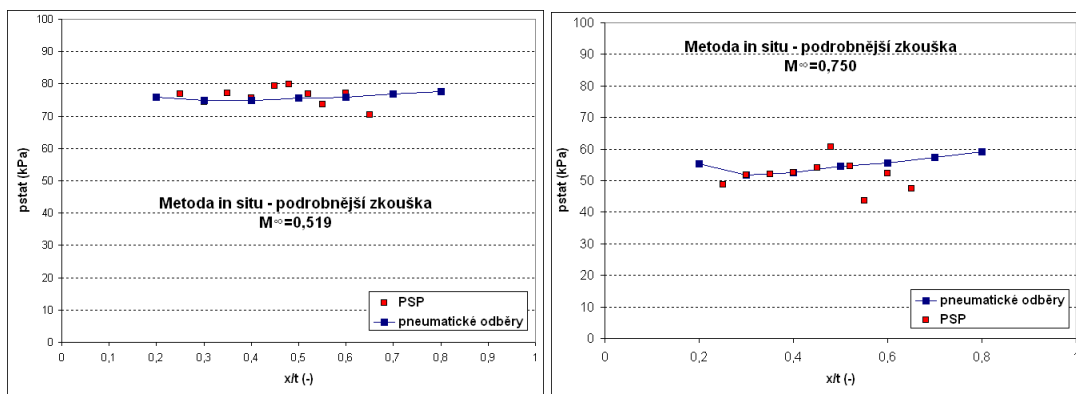


Graf 4: Porovnání vyhodnocení PSP metodou „in situ“ a „a priori“ pro režim $M_\infty = 0,878$.

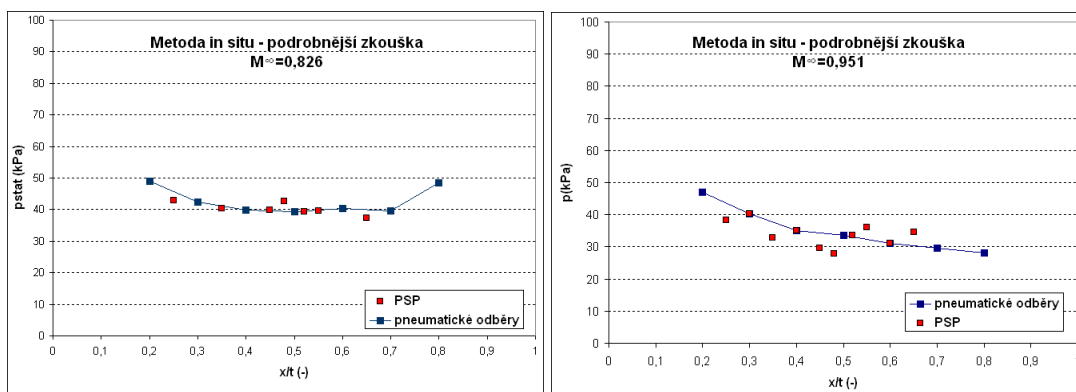


Graf 5: Porovnání vyhodnocení PSP metodou „in situ“ a „a priori“ pro režim $M_\infty = 0,948$.

Na základě tohoto měření byla pro další měření zvolena metoda „in situ“ a otestována podrobněji; skenovaly se body mezi odběry.



Grafy 6, 7: Metoda in situ, skenování mezi pneumatickými odběry pro režimy $M_\infty = 0,519$; 0,750.



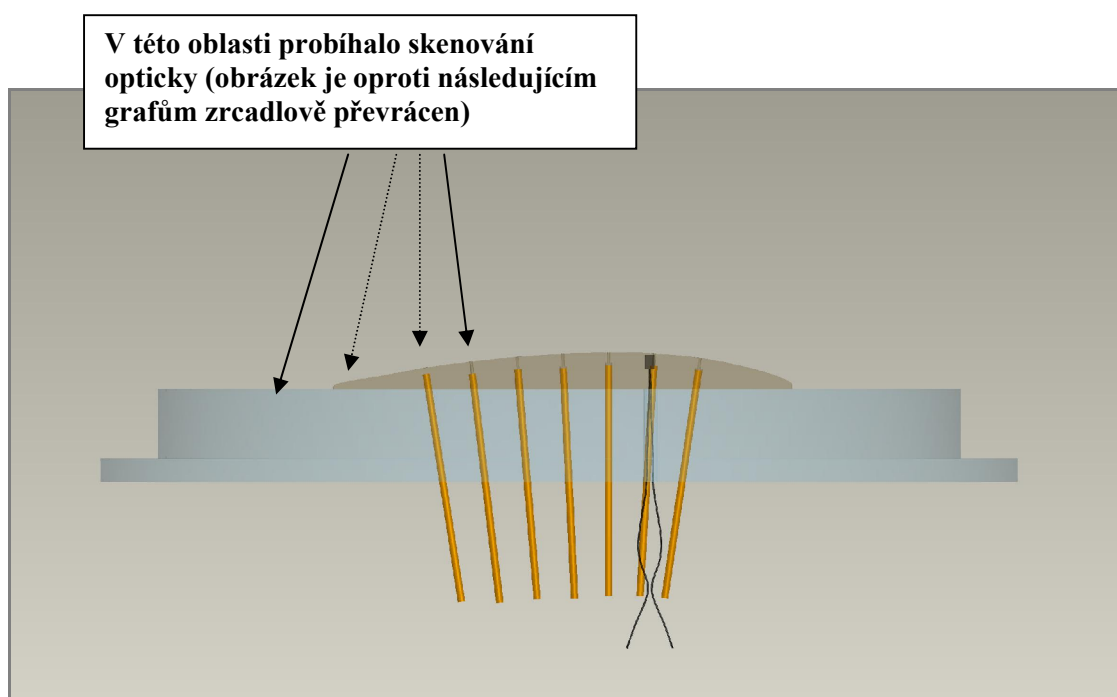
Grafy 8, 9: Metoda in situ, skenování mezi pneumatickými odběry pro režimy $M_\infty = 0,826$; 0,951.

8.2 PSP měření v místech bez odběrů

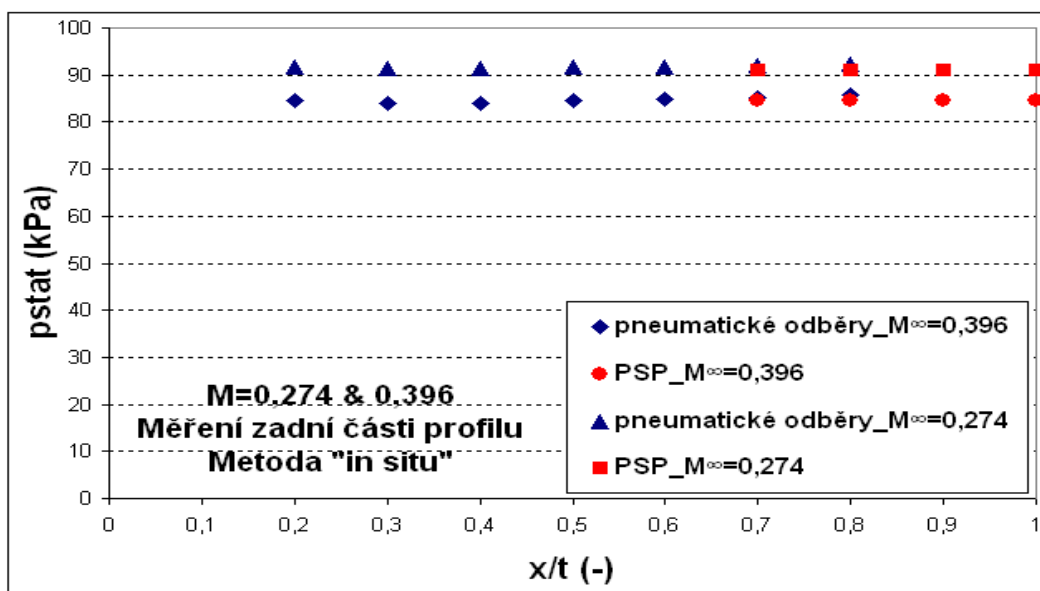
Měření zadní části profilu bylo součástí rozsáhlejšího plánu, ve kterém šlo o zprovoznění PSP systému tak, aby s ním bylo možné měřit na přímých lopatkových mřížích. Tunel, v němž se lopatkové mříže měří, je supersonický a cirkulační, takže nejde o podobné podmínky proudění, ale opticky je možné experimenty srovnat: v obou případech se skenuje zadní část

profilu na lopatce, takže značná část vybavení – optická cesta, samotné skenování - mohla být odladěna právě v cejchovacím tunelu při ekonomičtějším provozu.

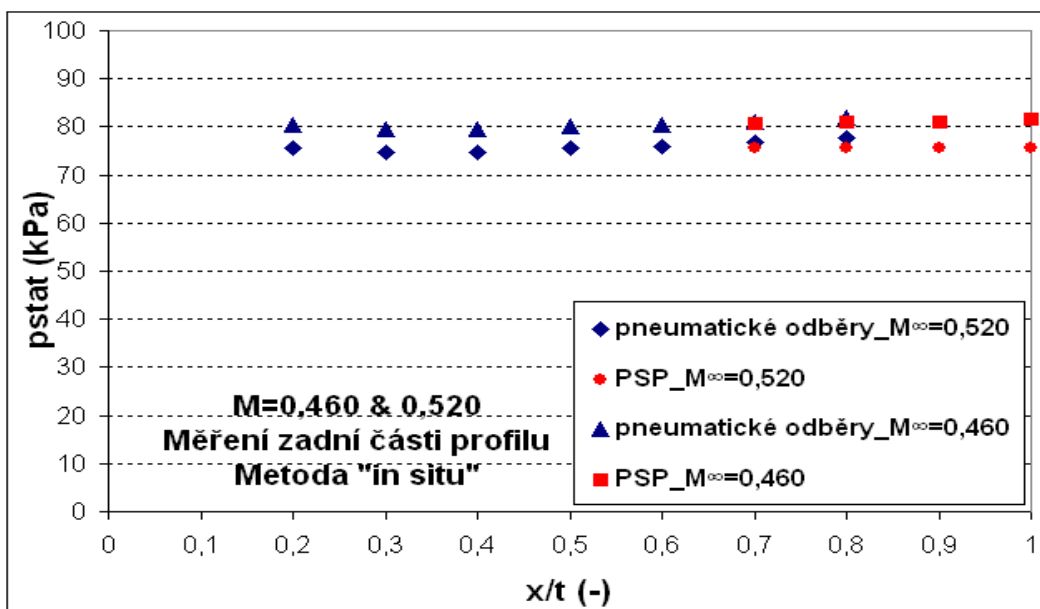
Na následujících grafech jsou znázorněny výsledky měření PSP v zadní části profilu; PSP výsledky by měly doplnit pneumatické odběry. Ty končí v 80% modelu (měřeno od náběžné hrany) a jsou zde pro názornost také uvedeny. Statický tlak p_{stat} je uveden absolutně. Optická data jsou získána i na odtokové hraně ($x/t = 1$).



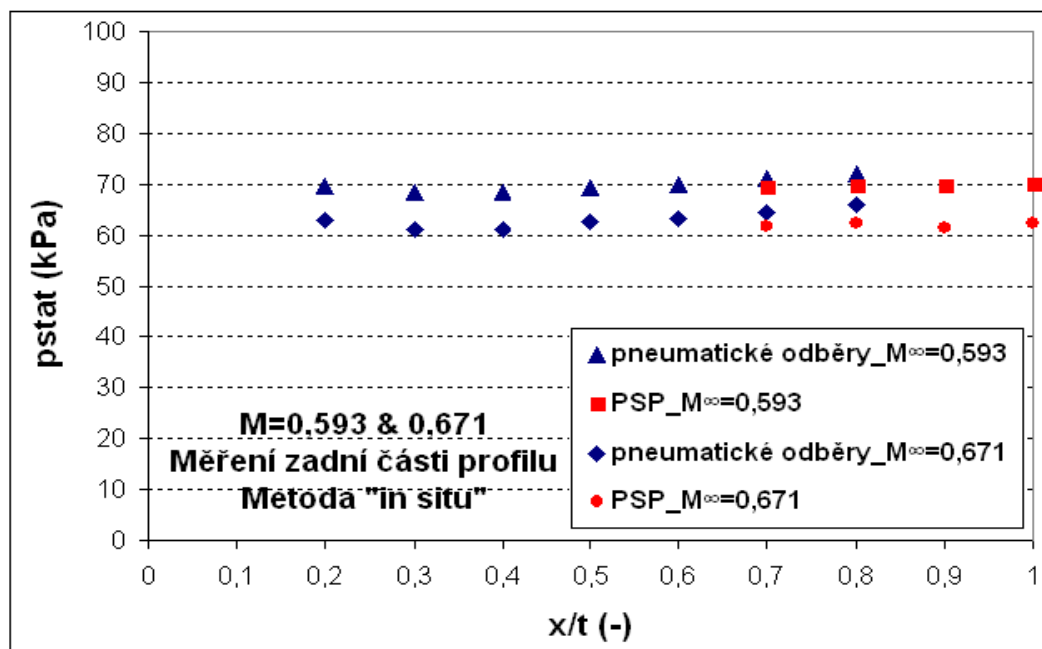
Obr. 8.1: Vrtulový profil je pokryt nátěrem a v zadní části (zhruba od šestého odběru směrem k odtokové hraně) je skenován optickou soustavou.



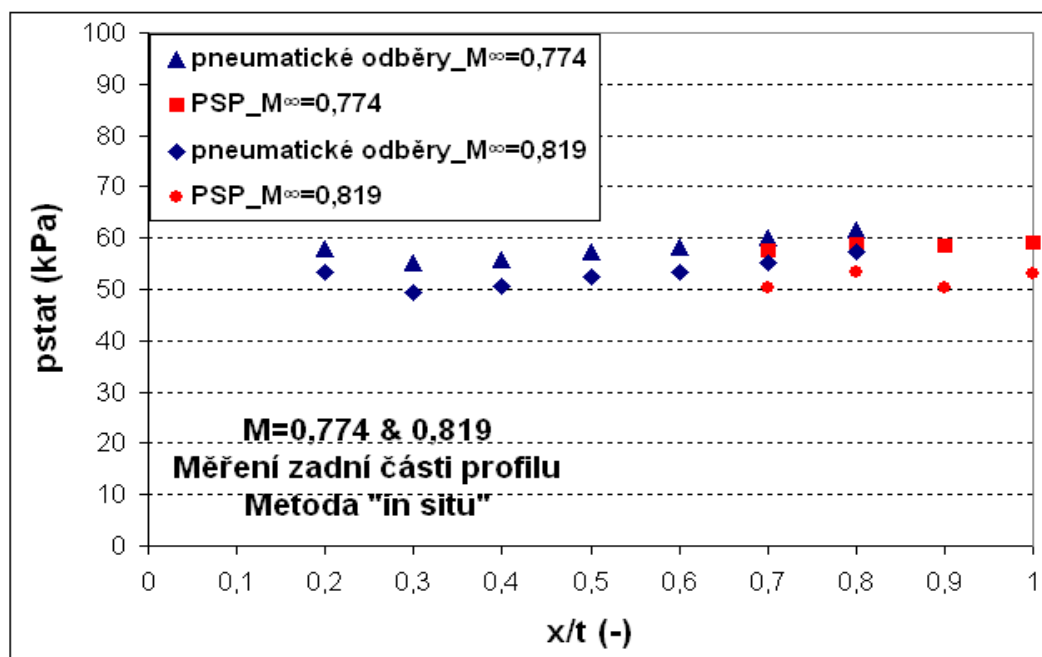
Graf 10: Měření pneumatickými odběry na modelu prahu je na zadní straně doplněno PSP měřením zpracovaným metodou „in situ“; režimy $M_\infty = 0,274$ a $M_\infty = 0,396$.



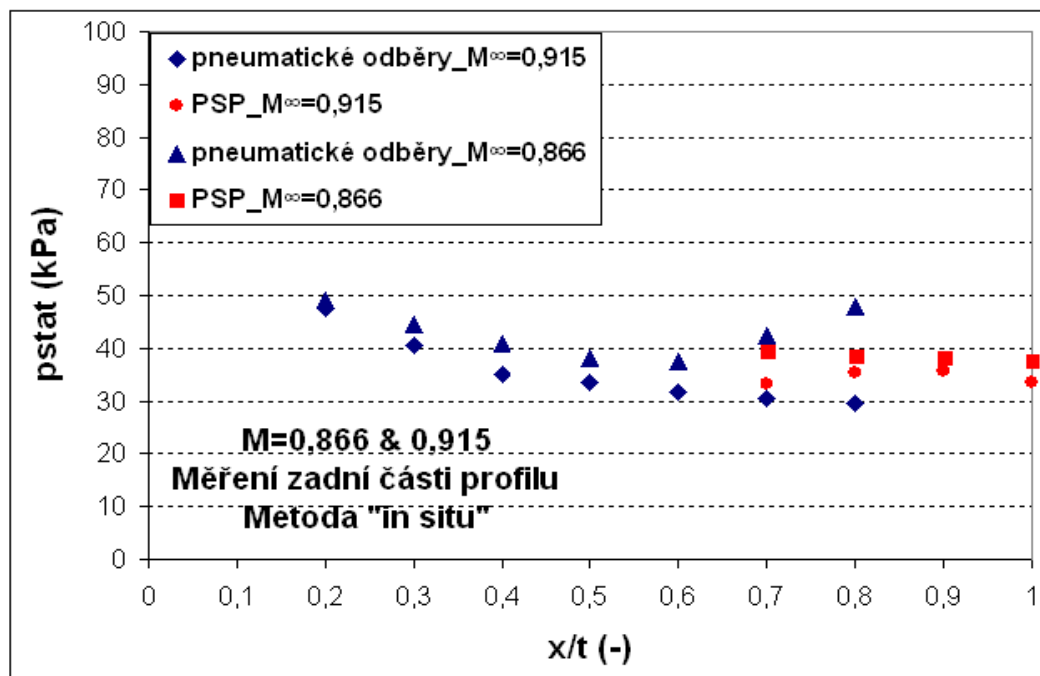
Graf 11: Měření pneumatickými odběry na modelu prahu je na zadní straně doplněno PSP měřením zpracovaným metodou „in situ“; režimy $M_\infty = 0,460$ a $M_\infty = 0,520$.



Graf 12: Měření pneumatickými odběry na modelu prahu je na zadní straně doplněno PSP měřením zpracovaným metodou „in situ“; režimy $M_\infty = 0,593$ a $M_\infty = 0,671$.



Graf 13: Měření pneumatickými odběry na modelu prahu je na zadní straně doplněno PSP měřením zpracovaným metodou „in situ“; režimy a $M_\infty = 0,774$ a $M_\infty = 0,819$.



Graf 14: Měření pneumatickými odběry na modelu prahu je na zadní straně doplněno PSP měřením zpracovaným metodou „in situ“; režimy $M_\infty = 0,866$ a $M_\infty = 0,915$.

8.3 Měření na profilu – tlaky s a bez PSP

Jako vedlejší produkt měření vyvstala otázka, zda nátlak v tomto případě ovlivňuje proudění. Když Machovo číslo nabíhajícího proudu překročí 0,8 (přesněji $M_\infty = 0,814$), opakovatelnost měření je obtížná. Od této rychlosti se na profilu tvoří rázová vlna, která i při mnohačetném měření byla pokaždé zachycena v jiné poloze (viz například v této kapitole graf pro $M_\infty = 0,814$, kdy se ráz vytvoří za 3. nebo 5. odběrem, mezi kterými je vzdálenost 2 cm po těživě; vliv nátlaku jako původce této nestability bylo potřeba vyloučit; jako druhý musel být eliminován vliv „počasí“, proto se v tomto jediném případě místo absolutních tlaků používá tlakový součinitel c_p).

Na základě poznámky v článku [10] v kapitole *Developments in progress* (str. 296), zmiňující prozkoumání vlivu nátlaku na proudění okolo modelu jako jednu z položek



k možnému vylepšení metodiky, lze konstatovat, že toto přeměření může stát na začátku celého výzkumu. Ten by mohl pokračovat až do molekulární úrovně interakcí mezi proudem a nátěrem (o nichž toho podle [10] zatím není mnoho známo). (Z této oblasti se lze spokojit s konstatováním, že vliv velkých sil, které na model při vyšších rychlostech působí, není patrný – jednoduše řečeno, nátěr není znatelně poškozen prouděním.)

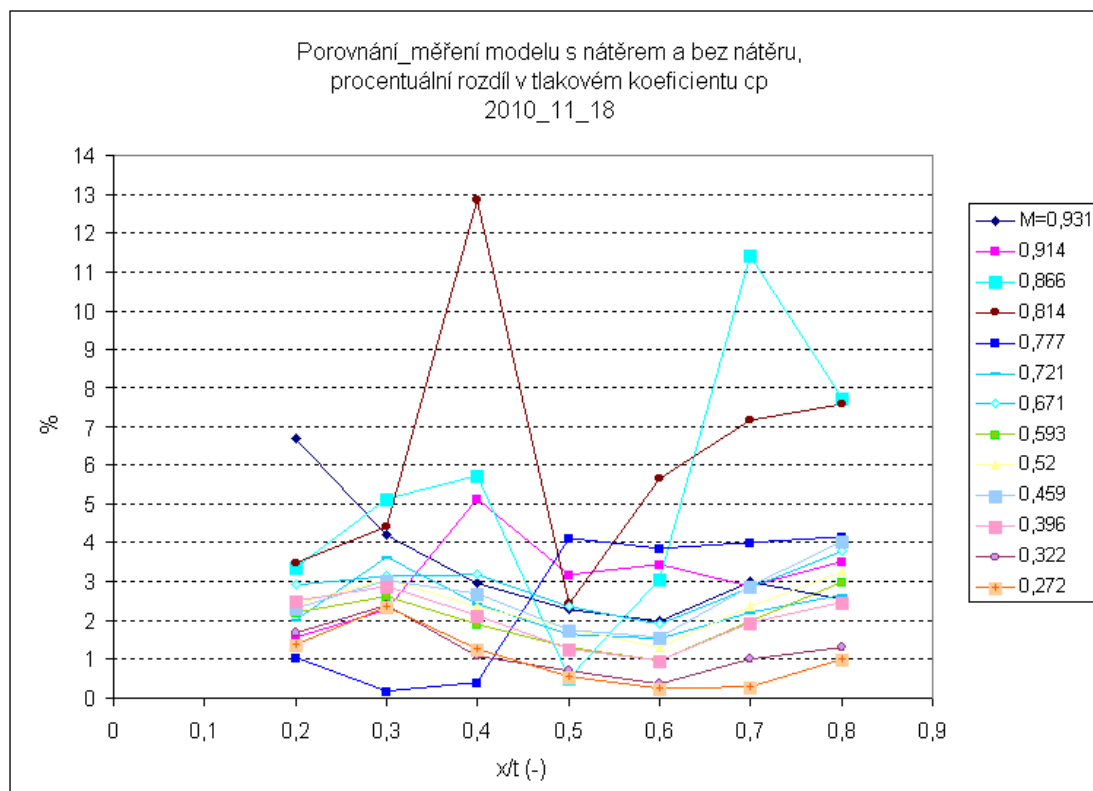
Vrstva nátěru je silná několik desítek mikrometrů. Měřicí kampaň zahrnovala přeměření modelu s nátěrem i bez nátěru v celém rozsahu podzvukového a transonického proudění a byly porovnány výsledné tlaky z tlakových odběrů.

Tabulka č.5 ukazuje rozdíly v porovnávaných Machových číslech nabíhajícího proudu (tlaku na modelu s nátěrem a bez nátěru), jež se pohybují okolo jednoho procenta.

Tabulka č.4:

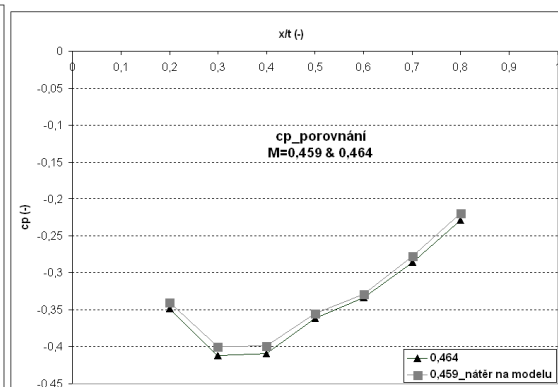
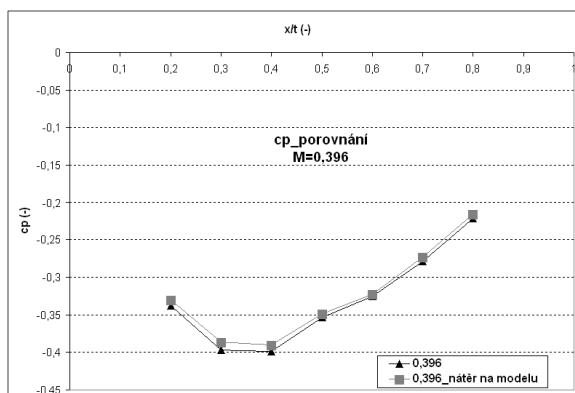
Režimy M_0 (-) bez nátěru (horní řádek)												
0,926	0,915	0,866	0,814	0,785	0,734	0,675	0,592	0,519	0,464	0,396	0,328	0,278
0,537	0,109	0	0	0,9	1,803	0,596	0,169	0,192	1,089	0	1,863	2,206
Režimy M_0 (-) s nátěrem se liší o ... % (spodní řádek)												

Na grafu 21 jsou vyneseny rozdíly: každá spojnice nese sedm tlakových odběrů z modelu pro jeden režim, každý bod spojnice rozdíl cp mezi měřením bez nátěru a měřením s nátěrem, vyneseny v procentech.

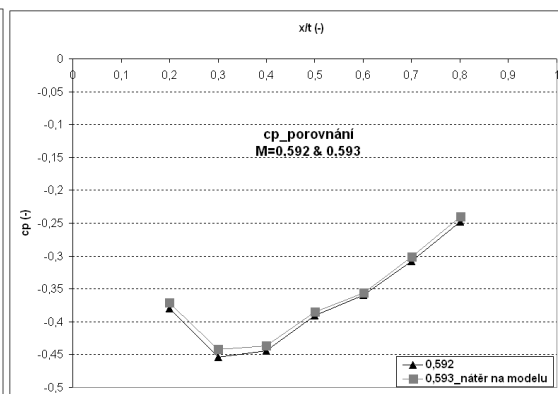
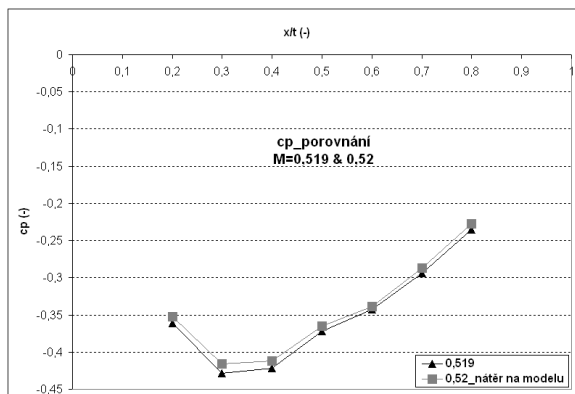


Graf 15: Procentuální porovnání rozdílů c_p v jednotlivých odběrech pro jednotlivé režimy, které jsou uvedeny v legendě.

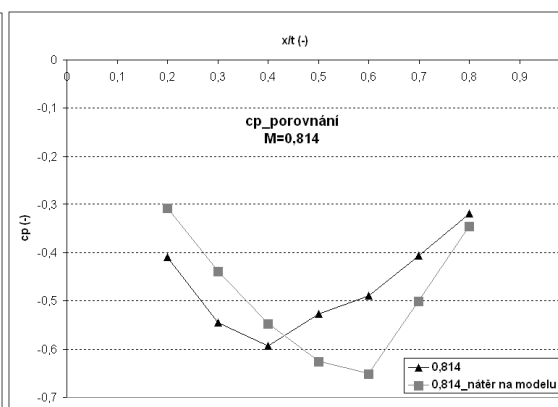
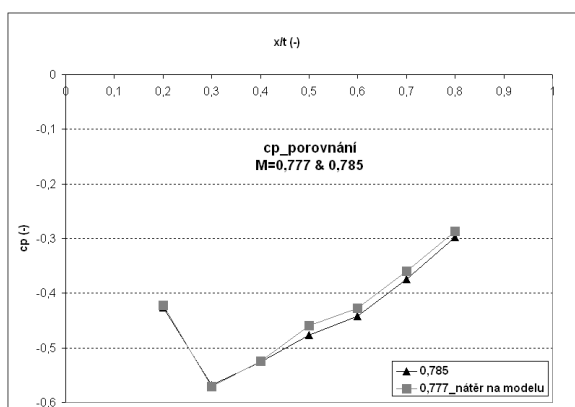
Velké procentuální rozdíly v c_p se začínají projevovat teprve v oblasti proudění blízkého zvukového, hlavně z důvodu výše popsaného – těžko lze v této oblasti při stávajícím vybavení nastavit stejné vstupní podmínky.



Grafy 16, 17: Měření vlivu vrstvy nátěru na proudové pole kolem modelu, režimy $M_\infty = 0,396$
a $M_\infty = 0,459$.



Grafy 18, 19: Měření vlivu vrstvy nátěru na proudové pole kolem modelu, režimy $M_\infty = 0,519$
a $M_\infty = 0,592$.

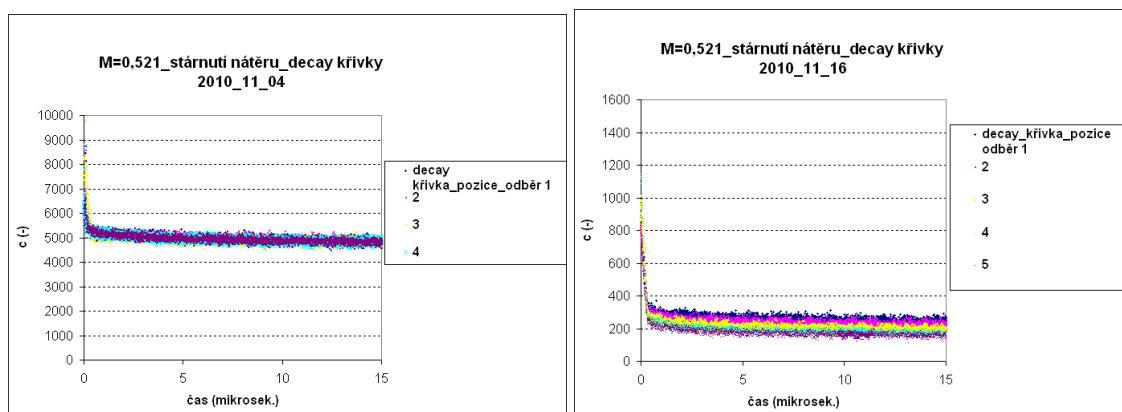


Grafy 20, 21: Měření vlivu vrstvy nátěru na proudové pole kolem modelu, režimy $M_\infty = 0,777$
a $M_\infty = 0,814$.

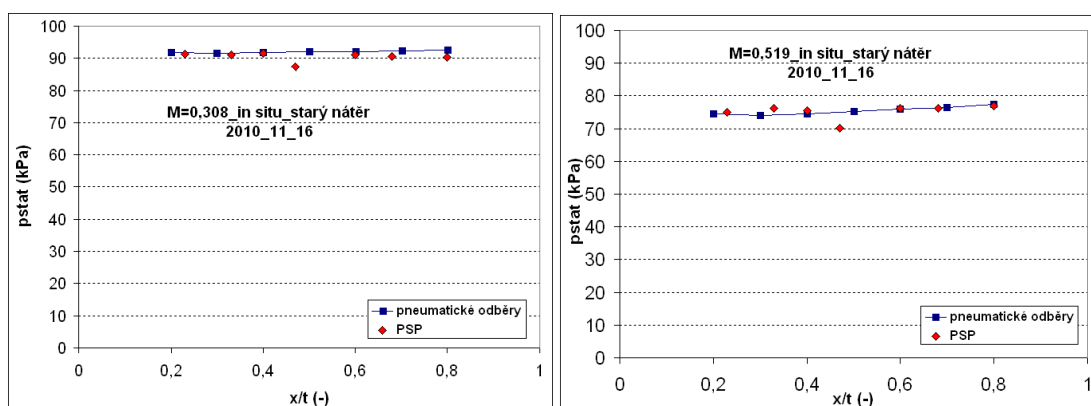
8.4 Měření s nátěrem novým a nátěrem degradovaným

Úskalí metody spočívá například v tom, že nátěr „stárne“ a jeho luminiscenční vlastnosti degradují. Je vhodné před každým měřením namíchat nový nátěr. K podrobnému zkoumání degradačního procesu není laboratoř aerodynamiky vybavena, proto byly učiněny pokusy orientačního charakteru. Na druhé straně, metoda získávání křivky zhasínání nátěru lifetime by tento nedostatek měla kompenzovat; nátěr o sice přichází o své luminiscenční vlastnosti, ale experimentátora zajímá průběh křivky, nikoliv přímo funkční hodnoty. Čili konstanty rovnic by měly zůstat stejné.

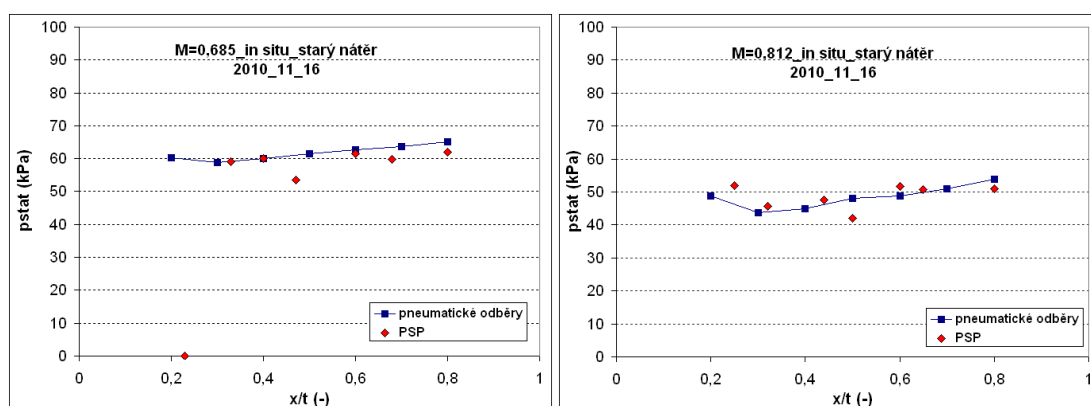
Například na několika následujících grafech je patrné, jak důležitý je tento poznatek. Měřeny byly různé režimy ve třech dnech (2.11., o dva dny později 4.11. a o čtrnáct, respektive 12 dnů později 16.11.) a pokaždé fotonásobič zaznamenal řádově jiné hodnoty c (-), neboli počet pulsů (odpovídající počtu fotonů). Tendence byla pochopitelně klesající. Otázka zněla, jestli nátěr může zůstat na modelu dva týdny, což bývá doba trvání sady navazujících zkoušek.



Grafy 22, 23: Různé křivky pro různě „staré“ nátěry, patrný je značný rozdíl v počtu c (-): vlevo nátěr nový, vpravo tentýž nátěr po dvanácti dnech. Na ose x je vynesena čas (v mikrosekundách), na ose y výstup z fotonásobiče („counts“, počty pulsů).



Grafy 24, 25: Měření na starém nátěru pro režimy $M_{\infty} = 0,308$ a $M_{\infty} = 0,519$. (Měření s novým nátěrem viz grafy 6-9).



Grafy 26, 27: Měření na starém nátěru pro režimy $M_{\infty} = 0,685$ a $M_{\infty} = 0,812$. (Měření s novým nátěrem viz grafy 6-9).

Pokud jsou porovnány výsledky měření se starým a novým nátěrem, lze pozorovat shodu: když někde nenastane systémová chyba (například v grafu č. 26 pro $M_{\infty} = 0,685$ je jeden PSP odběr evidentně zcela chybný, dále u nového nátěru v grafu č. 7 pro $M_{\infty} = 0,750$ je jisté, že některé odběry se od pneumatických liší o více než 10%), pohybují se rozdíly mezi PSP měřeními a pneumatickým měřením do 5% v obou případech.



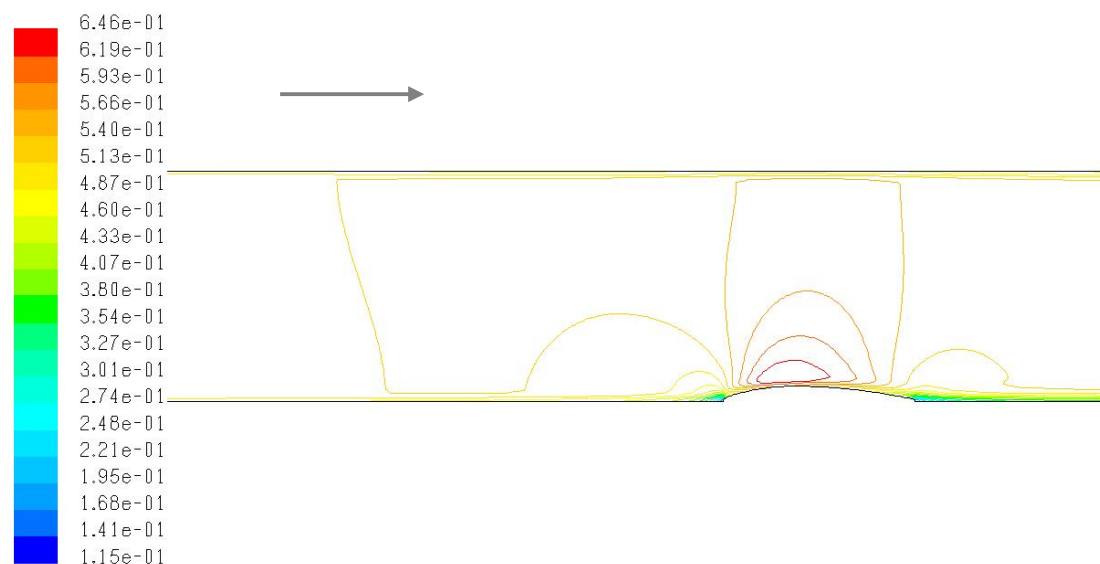
8.5 Porovnání experimentu a numerického výpočtu problému

Pro numerické modelování problému byl zvolen software Fluent. Modelování ve Fluentu bylo nutné k porovnání výsledků měření PSP na zadní části modelu, kde nejsou k dispozici data z pneumatických odběrů.

Do Fluentu byla zadávána experimentální data coby počáteční podmínky (celkový tlak na vstupu, statický tlak ze stěny a teplota na vstupu do tunelu coby parametry určující nabíhající proud). Postupně byly vyzkoušeny modely laminární a z turbulentních speciální pro letecké aplikace Spalart-Allmaras a k-omega SST. Nejlépe nakonec konvergoval model k-omega SST 2dd (aniž by bylo nutné zvyšovat kritéria konvergence), dokonce i v nejproblematictějších režimech nad $M_{\infty} = 0,8$.

Na grafech 34 až 39 jsou porovnány statické tlaky všech tří způsobů jejich zjišťování. Zde je potřeba zmínit, že pro tento typ tunelu (s atmosférickým vstupem bez jakékoliv úpravy vzduchu na vstupu) se zpravidla výsledky přepočítávají na bezrozměrný tlakový koeficient, aby se eliminoval vliv „počasí“ a měření bylo opakovatelné. V tomto konkrétním případě nebylo nutné počítat s tlakovým koeficientem, protože pneumatická měření a PSP měření byla provedena současně.

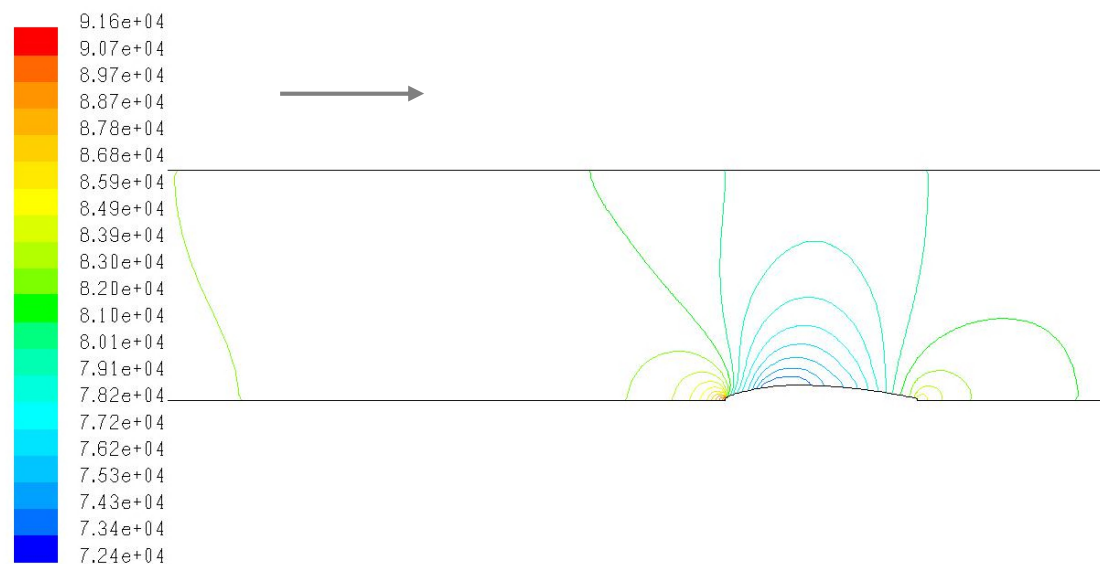
Před grafy s porovnáním experimentu a numerického výpočtu ještě pro úplnost výstupu z Fluentu jsou uvedeny kontury tlaku pro některé režimy kolem prahu a kontury Machova čísla v ploše kolem prahu.



Contours of Mach Number

FLUENT 6.1 (2d, dp, coupled imp, sstk)w Jun 01, 2011

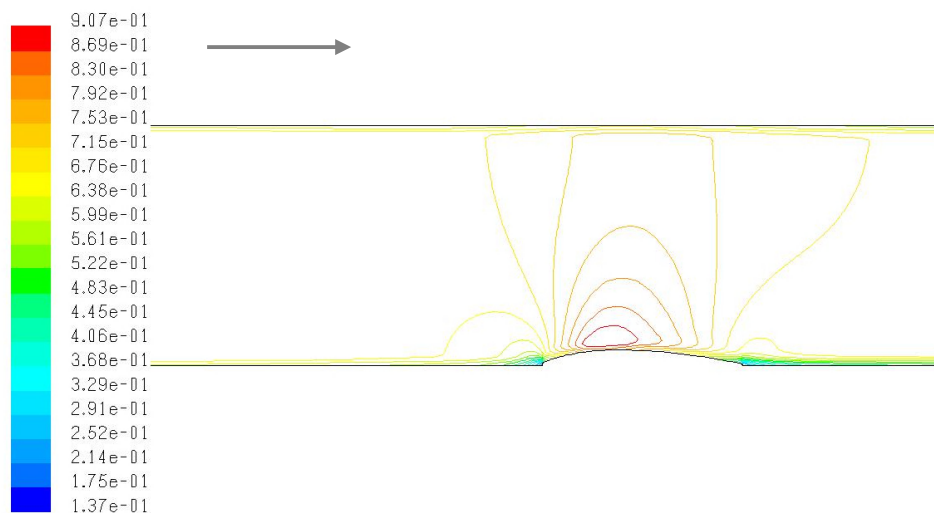
Graf 28: Kontury Machova čísla okolo modelu prahu, $M_{\infty} = 0,52$.



Contours of Static Pressure (pascal)

FLUENT 6.1 (2d, dp, coupled imp, sstk)w Jun 01, 2011

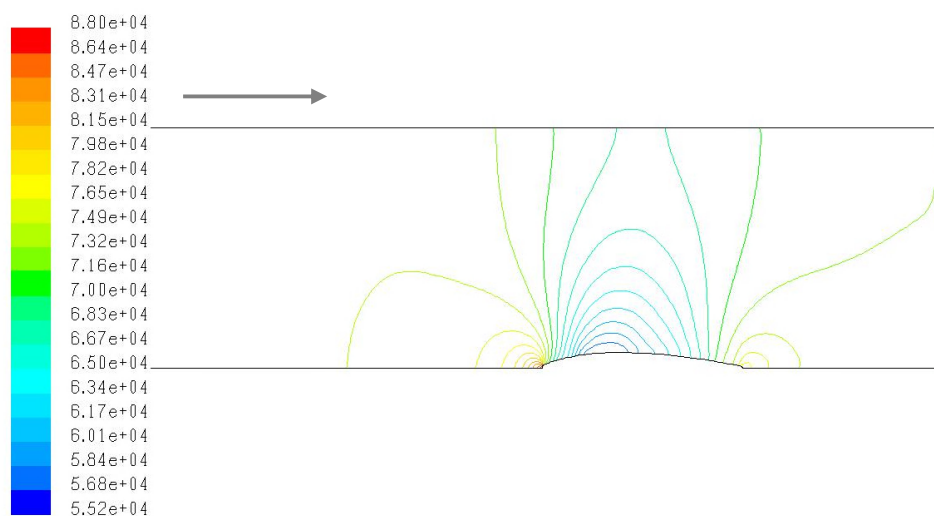
Graf 29: Kontury statického tlaku okolo modelu prahu, $M_{\infty} = 0,52$.



Contours of Mach Number

Jun 01, 2011
FLUENT 6.1 (2d, dp, coupled imp, sstk)

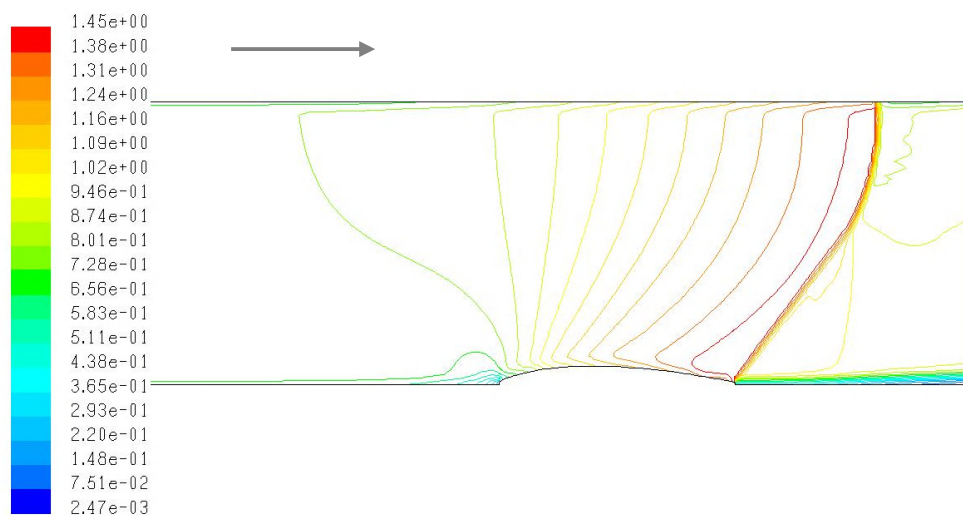
Graf 30: Kontury Machova čísla okolo modelu prahu, $M_\infty = 0,671$.



Contours of Static Pressure (pascal)

Jun 01, 2011
FLUENT 6.1 (2d, dp, coupled imp, sstk)

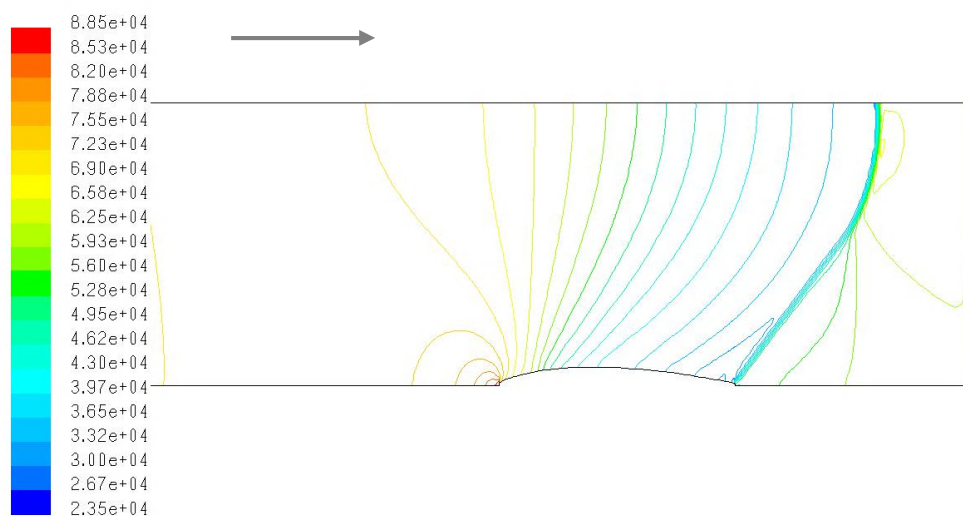
Graf 31: Kontury statického tlaku okolo modelu prahu, $M_\infty = 0,671$.



Contours of Mach Number

Jun 01, 2011
FLUENT 6.1 (2d, dp, coupled imp, sstk)

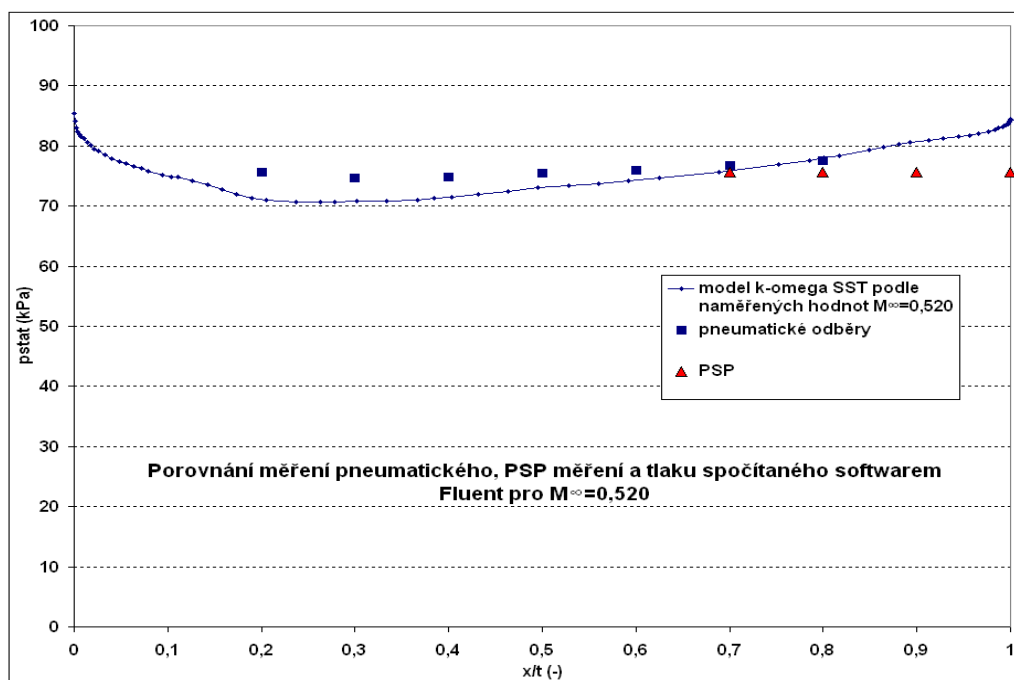
Graf 32: Kontury Machova čísla okolo modelu prahu, $M_\infty = 0,866$.



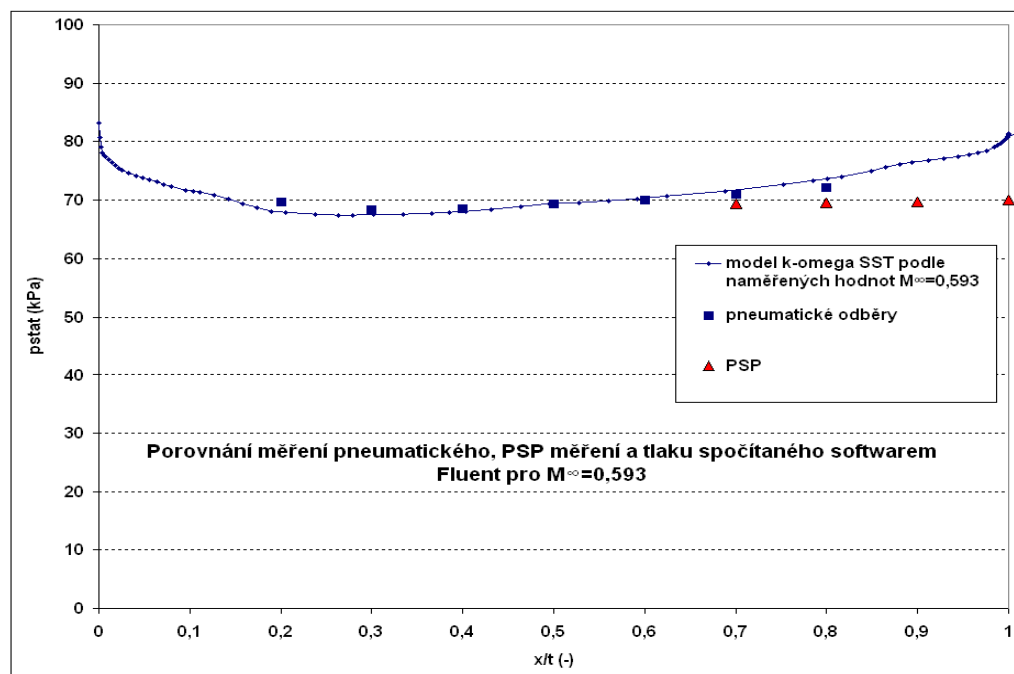
Contours of Static Pressure (pascal)

Jun 01, 2011
FLUENT 6.1 (2d, dp, coupled imp, sstk)

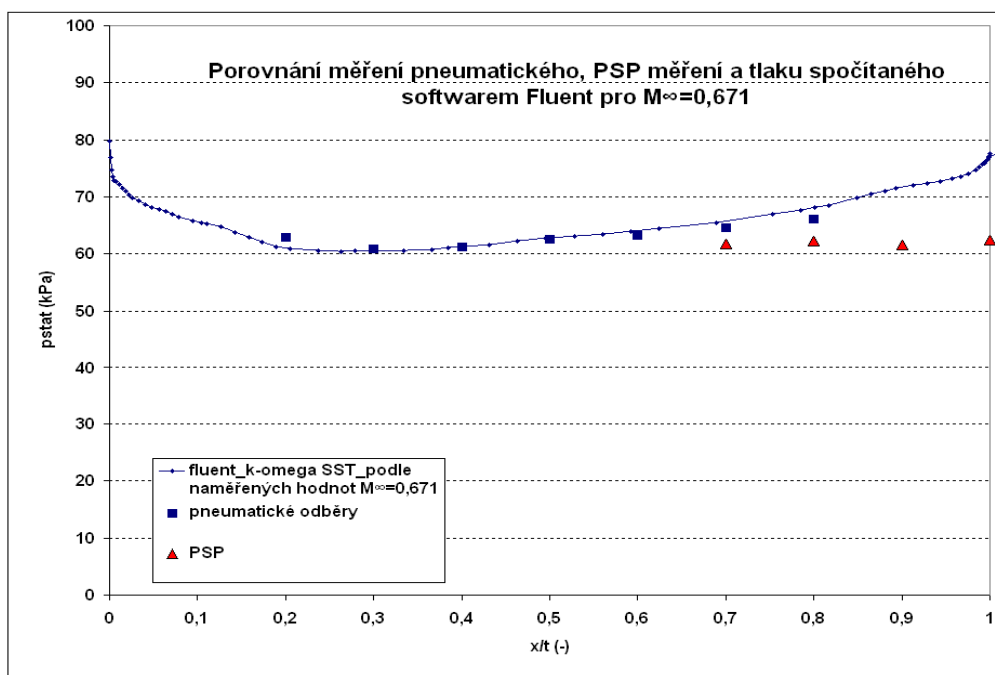
Graf 33: Kontury statického tlaku okolo modelu prahu, $M_\infty = 0,866$.



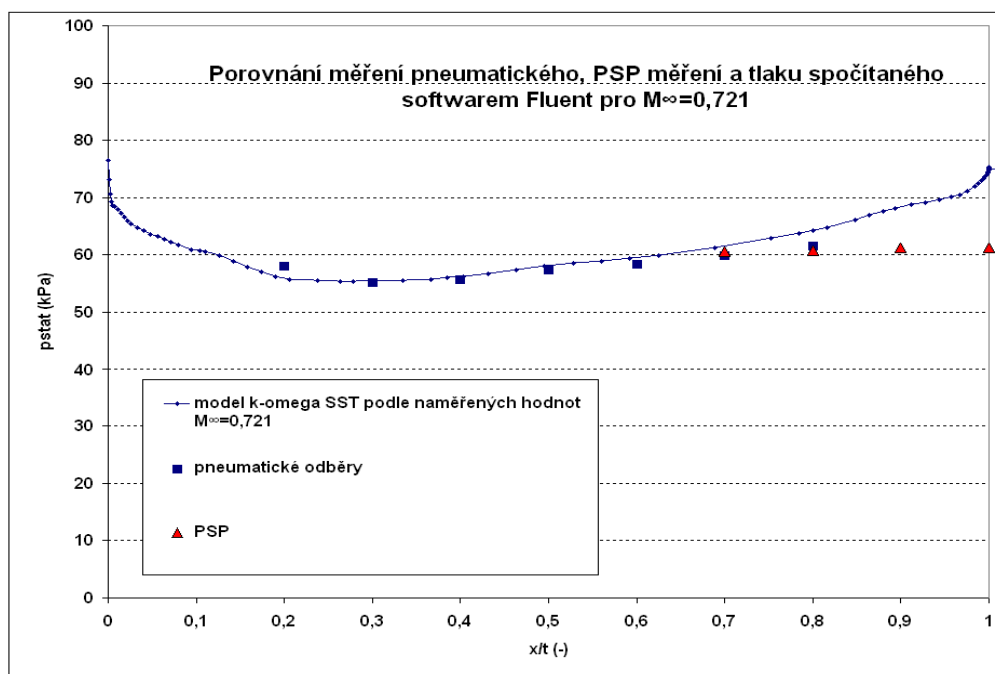
Graf 34: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,520$.



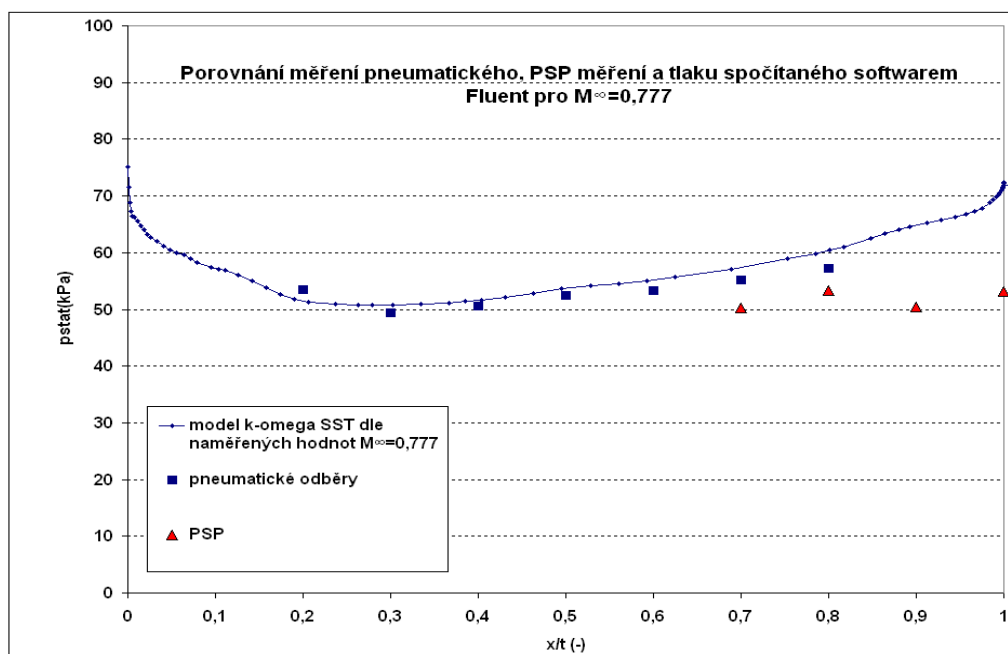
Graf 35: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,593$.



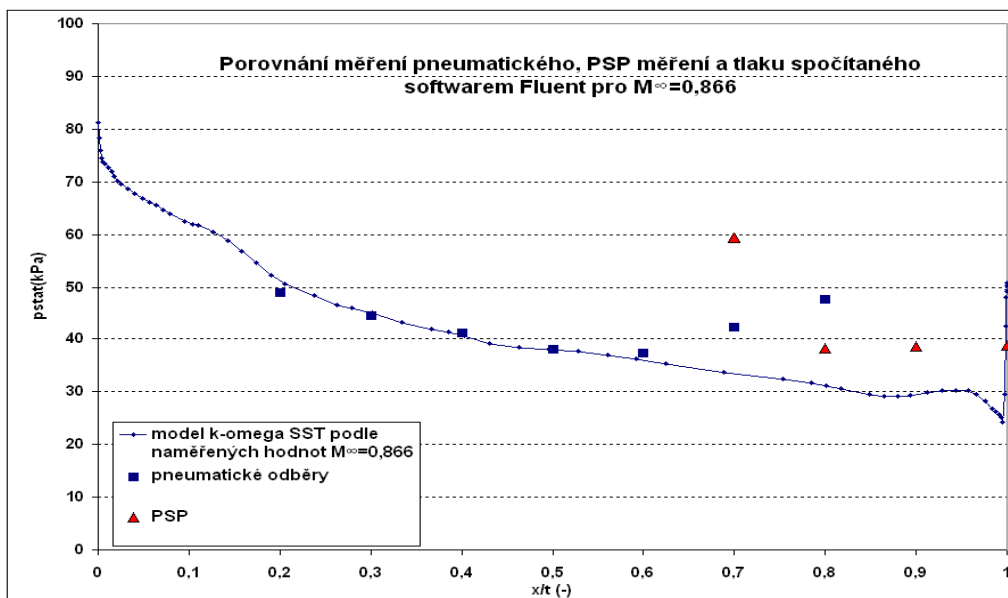
Graf 36: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_{\infty} = 0,671$.



Graf 37: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_{\infty} = 0,721$.



Graf 38: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,777$.



Graf 39: Statický tlak na sací straně vrtulového profilu pro rychlost $M_\infty = 0,866$.

9 Závěr

Bylo již řečeno, že PSP nátěry jsou ve světě aerodynamického experimentu běžně používané a vedle dalších optických metod, jako například Particle Image Velocimetry (PIV), poskytují rovnocennou alternativu ke klasickým způsobům měření. Zároveň doplňují informaci o tlakovém poli na modelu v místech, kde odběry být nemohou – například v miniaturních součástkách či v místech, kde je sledovaný profil příliš tenký. Pomáhají tak vytvořit komplexní obraz o proudovém poli.

Zařízení budované na Palmovce bylo potřeba vyzkoušet na malém a jednoduchém modelu, kde je proudové pole víceméně známé. Prvků, které se v průběhu výše popsané kampaně ověřovaly, byla nakonec celá řada. V první řadě se zkoušel samotný nátěr a rozsah jeho použitelnosti. Vzhledem k nedostatečné vybavenosti laboratoře po chemické stránce se očekávaly horší výsledky měření z nátěru samotného a spíš odladění metodiky s postupným přechodem k lepšímu (a nepoměrně dražšímu) nátěru. Nátěr s porphyrinem PtTFPP se podle výsledků kampaně použít dá s výhradami, pokud jsou dodrženy všechny parametry, které mají zabránit zvýšení nejistoty měření (například měřená škála režimů, zohlední se stárnutí nátěru, dbá se na teplotní nejistotu). Lze jej brát jako – zatím – orientační měřidlo s chybou do 5%. Ze zkušenosti je možné ještě jako poznámku na okraj říci, že každá dodávka platinového porphyrinu může být jiná a jinak funkční. Tuto skutečnost může zkoumat a přesné závěry činit pouze chemická laboratoř.

Dále se testovaly různé konfigurace optiky, což zůstalo stále otevřeným problémem. Výhodou uspořádání s fotonásobičem je, že tato elektronka je extrémně citlivá na záření, což usnadňuje výběr světelného zdroje. [Použití CCD nebo CMOS kamery (ve světě obvyklejší) limituje jednak cena, jednak vydatnost zdroje excitačního záření – v takovém případě se používají celá pole diod (stovky až tisíce) nebo laser].

PSP systém konfigurovaný jako ve VZLÚ lze uplatnit v menších aerodynamických tunelech. Rozvoj zařízení směřoval k tomu, aby se PSP používalo ve VZLÚ při měření v oblasti vnitřní aerodynamiky, a to konkrétně na zadní části přímé lopatkové mříže. Celé



testování se odehrávalo v cejchovacím tunelu na typově podobném modelu – na malém vrtulovém profilu s důrazem na jeho zadní část. Mělo několik fází. Nejdříve bylo nutné vyzkoušet různé metody kalibrace. Původní úmysl byl kalibrovat výhradně způsobem „a priori“, čili v kalibrační komoře odděleně od měření. Tento způsob byl později minimálně odložen k dalšímu řešení, protože se ukázalo, že určitá úskalí a tím pádem nejistoty měření způsobuje nestálost teplotního pole a malý rozsah teplot, na které se dá kalibrovat. Jednodušší bylo kalibrovat nátěr podle několika tlakových odběrů za chodu tunelu. Výsledek je sice zatížen dvojí chybou a jeho nejistota nemůže v tuto chvíli dosáhnout pod kýžené 1% (což je chyba tlakových snímačů a s touto nejistotou se již vstupuje do měření), nicméně pořád je to nejistota, která je předvídatelná a nijak výrazně nefluktuuje. Pro důvěryhodné výsledky experimentu je ovšem potřeba dosáhnout maximálně 1% nejistoty.

Samotné měření, při kterém se synchronizovalo tlakové a optické měření, zakončovalo celou etapu měření v cejchovacím aerodynamickém tunelu. Jeho výsledkem bylo tlakové rozložení v místech, kde se již nedají instalovat klasické pneu odběry (a případná instalace jiných snímačů, například povrchových, by byla náročná).

Porovnání s numerickým výpočtem dopadlo následovně: pro velkou část režimů se numerický výpočet a měření pneumatickými odběry liší o maximálně 3%. Lze říci, že v takovém případě je validace výsledků z PSP podle numerického výpočtu možná. Potom se pohybuje PSP měření v nejistotě do 10% (někde je to i více; pro komerční zakázku nemyslitelné, pro další rozvoj PSP povzbudivé). Výrazná neshoda vzniká v oblasti transoniky, což je obzvlášť patrné u $M_\infty = 0,866$. Všechny tři metody se zde významně rozcházejí a pro výsledky, kterým se již dá důvěřovat, by si tato oblast zasloužila podrobnější zkoumání. Každopádně je zřejmé, že pro lepší uplatnění PSP je potřeba pracovat dále a odhalit zdroj značné nejistoty.

Již bylo řečeno, že stávající nátěr je spíš zkušební a při dnešních možnostech (ve světě už v tomto bodě věda pokročila značně kupředu a PSP je nabízen jako standardní komerční produkt, lze si vybrat z široké škály pro různá použití, je chráněn patenty



a výrobními tajemstvími) by stálo za úvahu vyzkoušení jiného. S tímto se dá ladit nastavení optické cesty, později vyvinout 2D skenování zakřivené plochy, vypracovat si sběr dat a jejich další zpracování a použití, ale nejistota měření může být pořád nedostačující.

PSP systém ve VZLÚ nebude konkurovat velkým systémům provozovaným v podnicích zmiňovaných v odstavci 2.1 PSP ve světě, ale má zatím rezervy, při jejichž vyčerpání bude tím, co se od něj očekávalo – doplňkovým měřením, které pomůže objasnit aerodynamické jevy v místech, kam nemůžou klasické metody měření.



Použitá literatura

- [1] STERN, O., VOLMER, M. *Über die Abklingzeit der Fluoreszenz*. Physik. Zeitschr. 20, 183–188, 1919.
- [2] NAGAI, H.; NARAOKA, R.; SAWADA, K.; ASAI, K. *PSP measurement of Pressure Distribution in a Supersonic Micronozzle*. Published in: AIAA Journal, Vol. 46, No.1, pp. 215 – 222, 2008.
- [3] MÉRIENNE, M.-C., LE SANT Y. *Surface pressure measurements by using pressure-sensitive paints* (Published in: Aerospace Science and Technology 9 (2005) 285-299; available online 19 March 2005 on www.sciencedirect.com).
- [4] MÉRIENNE, M.-C., LE SANT Y., ANCELLE, J.; SOULEVANT, D. – Unsteady pressure measurement instrumentation using anodized-aluminium PSP applied in a transonic wind tunnel (Published in: Measurement Science and Technology 15, 2004, pp. 2349 – 2360).
- [5] KLEIN CHR., ENGLER R.H., HENNE U., SACHS W. *Application of pressure-sensitive paint for determination of the pressure field and calculation of the forces and moments of models in a wind tunnel*. Published in: Experiments in Fluids, (2005) 39, pp. 475 – 483.
- [6] ENGLER, R.H. et al. *Pressure Sensitive Paint Measurement in a Transonic Compressor Stage*. Published in Proceedings of the Symposium, Florence, 21.-22.2000, Measurement Techniques in transonic flow.
- [7] GREGORY, J.W. et al. *A review of pressure-sensitive paint for high-speed and unsteady aerodynamics*. Published in: Journal of Aerospace Engineering, 25 October 2007.



- [8] HARMON, K. *Planes under Pressure: Glowing Paint Reveals Flight Physics*. URL: [HTTP://WWW.SCIENTIFICAMERICAN.COM/ARTICLE.CFM?ID=PRESSURE-SENSITIVE-PAINT](http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=pressure-sensitive-paint), 26.2.2009.
- [9] SULLIVAN, J. - *Temperature and Pressure Sensitive Paint*. (Published in: Lecture Series 2001-01, Advanced Measurement Techniques, von Karman Institute for Fluid Dynamics).
- [10] <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/jablonski/jabintro/index.html>.
- [11] ONDRUS, V. *Pressure sensitive paints – a chemical point of view*. PSP Course Notes, Gottingen 2008.
- [12] PŘÍHODA, J., LOUDA, P. *Matematické modelování turbulentního proudění*. (Nakladatelství ČVUT, 2007).
- [13] KLEIN, CH. *Cameras for PSP and TSP*. (PSP Course Notes, Gottingen, DLR, 2008).
- [14] ENGLER, ROLF H. *Principles of PSP VII, Light sources*. (PSP Course Notes, Gottingen, DLR, 2008).
- [15] DAVIES, A. *Principles of PSP IV: Lifetime method*. (PSP Course Notel, Gottingen, DLR, 2008).